

ÍTALO CAVASSIM JUNIOR

**UTILIZAÇÃO DE DADOS DERIVADOS DO VARREDOR  
LASER NA GERAÇÃO DE CARTAS PLANIMÉTRICAS NA  
ESCALA 1:2000**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientadores: Prof. Dr. Jorge Antonio Silva  
Centeno  
Prof. Dr. Edson Aparecido  
Mitishita

CURITIBA

2004

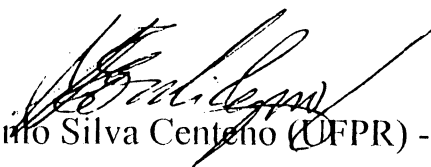
**“UTILIZAÇÃO DE DADOS DERIVADOS DO VARREDOR  
LASER NA GERAÇÃO DE CARTAS PLANIMÉTRICAS NA  
ESCALA 1:2000”**

**POR**

**ÍTALO CAVASSIN JUNIOR**

Dissertação nº 174 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre  
no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade  
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

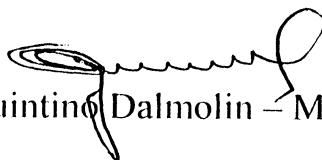
Curitiba, 02 de julho de 2004.



Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno (UFPR) - Orientador e Presidente



Prof.ª Dr.ª Christel Lingnau - Membro (UFPR)



Prof.ª Dr.ª Quintino Dalmolin - Membro (UFPR)

*Dedico este trabalho aos meus  
queridos e amados pais:  
Ítalo e Olívia*

## **AGRADECIMENTOS**

Desejo externar os meus agradecimentos a todos que diretamente ou não contribuíram para a realização deste trabalho. Especialmente:

- Ao Prof. Dr. Jorge Centeno, pela orientação e incentivo no decorrer deste trabalho;
- Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Edson Mitishita, pelas dicas que contribuíram para a conclusão deste trabalho, e também pela amizade e irrestrito apoio;
- A todos os colegas do curso, em especial aos amigos de sala Daniel Rodrigues dos Santos, Alvaro Muriel Lima Machado e Roosevelt de Lara Santos Junior, que muito contribuíram para a conclusão deste trabalho. A amiga Selma Regina, pelas sugestões e apoio durante o decorrer do curso. Ao amigo Luisnei Martini, pelo apoio que deu nos trabalhos de campo e principalmente pela amizade que temos desde a graduação;
- Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), pelo fornecimento dos materiais necessários à realização deste trabalho;
- À Universidade Federal do Paraná, em especial ao Departamento de Geomática, pelo fornecimento dos equipamentos necessários para a realização deste trabalho;
- Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo;
- À minha família, em especial meus pais, pelo carinho, compreensão, e incentivo para a realização deste trabalho;
- E a Deus.



## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES .....</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO .....	2
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 MODELO DIGITAL DE TERRENO E MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE.....	4
2.1.1 Modelo Digital de terreno.....	4
2.1.1.1 Aquisição das amostras ou amostragem.....	4
2.1.1.2 Geração do modelo.....	5
2.1.1.3 Utilização do modelo e aplicações.....	6
2.1.2 Modelo Digital de Superfície.....	6
2.2 VARREDURA A LASER.....	7
2.2.1 Tipos de Sistema de Varredura a Laser.....	7
2.2.1.1 Sistema Estático .....	8
2.2.1.2 Sistema Dinâmico .....	8
2.2.2 Funcionamento do Sistema de Varredura a Laser .....	9
2.2.2.1 Pulsos do Sistema de Varredura a Laser .....	10
2.2.2.1.1 Divergência do Pulso.....	10
2.2.2.1.2 Diâmetro do pulso e largura da faixa .....	11
2.2.2.1.3 Resolução e precisão do pulso .....	13
2.2.2.2 Sistema de varredura do espelho.....	17
2.2.2.3 Sistema de posição e orientação.....	19

2.2.2.4 Processamento dos dados .....	20
2.2.3 Características do Sistema de Varredura a Laser .....	21
2.2.3.1 Erros .....	24
2.3 MONORRESTITUIÇÃO DIGITAL .....	26
2.3.1 Orientação Interior da Aerofoto.....	26
2.3.1.1 Parâmetros Geométricos da câmara .....	27
2.3.1.2 Observações das marcas fiduciais.....	27
2.3.1.3 Parâmetros de transformação entre o sistema CAD e o fiducial;.....	27
2.3.1.4 Transformações entre sistema fiducial e fotogramétrico .....	29
2.3.1.5 Correção dos erros sistemáticos devido a distorção e refração fotogramétrica.....	29
2.3.1.5.1 Trabalho do filme .....	29
2.3.1.5.2 Distorção de lentes .....	30
2.3.1.5.2 Refração fotogramétrica .....	31
2.3.2 Orientação espacial aproximada da aerofoto.....	32
2.3.3 Orientação exterior.....	33
2.3.4 Obtenção das informações altimétricas da região a ser monorestituída. ....	34
2.3.5 Digitalização vetorial das entidades gráficas de interesse .....	34
2.3.6 Transformações entre referenciais e do sistema de projeção. ....	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
3.1 ÁREA TESTE.....	36
3.2 MATERIAL UTILIZADO .....	37
3.3 METODOLOGIA .....	38
3.3.1 Levantamentos de pontos com GPS.....	38
3.3.2 Geração de Imagens com os dados do Sistema de Varredura a Laser.....	39
3.3.2.1 Geração de Imagens em Tons de Cinza .....	40
3.3.2.2 Geração das Imagens Intensidades.....	41
3.3.3 Modelo Digital de Superfície.....	42
3.3.4 Monorrestituição digital .....	43
3.3.4.1 Interpolação altimétrica .....	44

3.3.4.1.1 Vizinho mais próximo .....	45
3.3.4.1.2 Superfície triangular plana.....	45
3.3.5 Análise estatística dos resultados.....	45
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
4.1 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE GEOMÉTRICA DO SISTEMA DE VARREDURA A LASER.....	49
4.2 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA CARTA PLANIALTIMÉTRICA.....	51
4.3 AVALIAÇÃO DA DIGITALIZAÇÃO EFETUADA NAS IMAGENS OBTIDAS POR VARREDURA A LASER .....	52
4.3.1 Vetorização das Entidades.....	57
4.3.2 Avaliação da qualidade geométrica da digitalização sobre a imagem de varredura a laser.....	58
4.4 MONORRESTITUIÇÃO DIGITAL .....	64
4.5 VETORIZAÇÃO DAS ENTIDADES.....	66
4.6 RETIFICAÇÃO DO ARQUIVO GRÁFICO .....	66
4.6.1 Resultados da retificação utilizando o modelo digital de superfície derivado de varredura a laser .....	67
4.7 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	79
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 01 – Funcionamento do sistema de varredura a laser.....	9
FIGURA 02 – Diâmetro do pulso laser. (a) considerando o diâmetro de abertura d; (b) considerando o diâmetro de abertura muito pequeno.....	11
FIGURA 03 – Largura da faixa para terrenos planos.....	12
FIGURA 04 – Diâmetro do pulso laser para terrenos inclinados .....	13
FIGURA 05 – Determinação da distância entre o sensor e a superfície .....	14
FIGURA 06 – Sistema oc de pulsos senoidais.....	15
FIGURA 07 – Mecanismos de varredura. (a) espelho oscilador; (b)varredura palmer; (c)polígono de rotação .....	18
FIGURA 08 – Etapas do processamento .....	21
FIGURA 09 – Demonstração do primeiro e último pulso.....	22
FIGURA 10 – Imagens retornos do pulso laser. (a) imagem do primeiro retorno do pulso. (b) imagem do segundo retorno do pulso. ....	23
FIGURA 11 – Equipamento altm 2050 da optech: (a) parte frontal e (b) parte posterior .....	24
FIGURA 12 – Localização da área teste .....	36
FIGURA 13 – Imagem em tons de cinza do primeiro retorno do pulso (a) e imagem em tons de cinza do último retorno do pulso (b) .....	41
FIGURA 14 – Imagem intensidade do primeiro retorno do pulso (a) e imagem intensidade do último retorno do pulso (b).....	42
FIGURA 15 – Resíduos das coordenadas gps-varredor laser na escala 1: 2000 .....	50
FIGURA 16 – Resíduos das coordenadas para a avaliação da base cartográfica .....	52
FIGURA 17 – Composição colorida dos dados altimétricos e intensidade derivados do varredor laser.....	57
FIGURA 18 – Exemplo feições vetorizadas.....	58
FIGURA 19 – Resíduos das coordenadas da base cartografica com o varredor laser para construções.....	60
FIGURA 20 – Exemplo de vetorização sobre edificações de pequeno porte.....	61
FIGURA 21 – Resíduos das coordenadas da base cartografica com o varredor laser para vias.....	63
FIGURA 22 – Resíduos das coordenadas base-monorrestituição para edificações, utilizando o interpolador vizinho mais próximo .....	68
FIGURA 23 – Resíduos das coordenadas base-monorrestituição para edificações, utilizando o interpolador superfície plana .....	70
FIGURA 24 – Resíduos das coordenadas base-monorrestituição para vias, utilizando o interpolador vizinho mais próximo .....	72
FIGURA 25 – Resíduos das coordenadas base-monorrestituição para vias, utilizando o interpolador superfície plana.....	74
FIGURA 26 – Resíduos das coordenadas base-monorrestituição para casas, utilizando o interpolador vizinho mais próximo .....	77
FIGURA 27 – Resíduos das coordenadas base-monorrestituição para casas, utilizando o interpolador superfície plana.....	79

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 01 - Características do equipamento laser do lactec.....	23
TABELA 02 – Resolução da grade.....	39
TABELA 03 – Especificações para classificar cartas .....	46
TABELA 04 – Diferença entre coordenadas gps e coordenadas do varredor laser .....	49
TABELA 05 - Diferença entre coordenadas gps e coordenadas da base cartográfica ...	51
TABELA 06A – Chave da interpretação dos dados laser - vegetações .....	53
TABELA 06B – Chave da interpretação dos dados laser - vegetações.....	54
TABELA 07 – Chave da interpretação dos dados laser - construções .....	55
TABELA 08 – Chave da interpretação dos dados laser - vias.....	56
TABELA 09 - Diferença entre os pontos obtidos na imagem de varredura a laser com a base cartográfica (construções).....	59
TABELA 10 – Avaliação estatística da vetorização sobre a imagem derivada do sistema de varredura a laser.....	61
TABELA 11 - Diferença entre os pontos obtidos na imagem de varredura a laser com a base cartográfica (vias) .....	62
TABELA 12 – Avaliação estatística da vetorização sobre a imagem derivada do sistema de varredura a laser.....	64
TABELA 13 – Valores das médias e emq caculados em <i>píxel</i> .....	64
TABELA 14 – Resíduos da orientação interior .....	65
TABELA 15 – Resíduos da orientação espacial aproximada .....	65
TABELA 16 – Resíduos da orientação espacial exata .....	66
TABELA 17A – Diferença entre pontos obtidos na retificação com os pontos da base para construções utilizando o interpolador vizinho mais próximo .....	67
TABELA 17B – Diferença entre pontos obtidos na retificação com os pontos da base para construções utilizando o interpolador vizinho mais próximo .....	68
TABELA 18 – Diferença entre pontos obtidos na retificação com os pontos da base para construções utilizando o interpolador superfície plana .....	69
TABELA 19 – Diferença entre pontos obtidos na retificação com os pontos da base para vias, utilizando o interpolador vizinho mais próximo.....	71
TABELA 20 – Diferença entre pontos obtidos na retificação com os pontos da base para vias, para vias utilizando o interpolador superfície plana.....	73
TABELA 21 – Avaliação estatística das feições retificadas com informações altimétricas derivadas do sistema de varredura a laser.....	75
TABELA 22 – Diferença entre pontos obtidos na retificação com os pontos da base para casas, utilizando o interpolador vizinho mais próximo .....	76
TABELA 23 – Diferença entre pontos obtidos na retificação com os pontos da base para casas, utilizando o interpolador superfície plana .....	78
TABELA 24 – Raio de 90% dos pontos segundo a classificação de cartas do pec. ....	80
TABELA 25 – Classificação de cartas segundo o erro médio quadrático.....	80

## **LISTA DE ABREVIACÕES**

**MDT – Modelo Digital de Terreno**

**MDS – Modelo Digital de Superfície**

**GPS – Global Position System**

**SMI – Sistema de Medição Inercial**

**CAD – Computer Aided Designer**

**PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica**

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para obtenção de cartas planimétricas na escala 1:2000, a partir de imagens derivadas do varredor laser e da monorrestituição de aerofotos de grande escala (1:6000). O Sistema de Varredura a Laser representa uma tecnologia automatizada na obtenção de informações altimétricas e planimétricas da superfície. A aplicação da monorrestituição necessita de informações altimétricas a fim de retificar a digitalização vetorial das entidades de interesse presentes na fotografia aérea. Duas formas de utilizar os dados derivados da varredura a laser são verificadas: a digitalização na tela, usando imagens “*raster*” dos dados altimétricos e de intensidade, e usando dados altimétricos como base para a monorrestituição digital de fotografias aéreas. A qualidade destes resultados foi avaliada confrontando cada um deles com uma carta obtida por restituição convencional considerada, neste trabalho, isenta de erros. Essa comparação foi feita tomando-se como base a diferença entre as coordenadas coletadas das entidades digitalizadas da restituição convencional e das coordenadas dos pontos obtidos da imagem derivada do varredor laser e da monorrestituição. Na verificação dos resultados foi utilizado o PEC como um padrão de qualidade e as discrepâncias dos pontos foram classificados como de classe A na escala 1:2000.

## **ABSTRACT**

This dissertation presents an alternative methodology for the generation of planimetric maps at a 1:2000 scale, from images taken with a Laser Scanner together with the monorestitution of large-scale aerial photos at a 1:6000 scale. Laser Scanning represents an automated technology for the obtainment of altimetric and planimetric information of the land surface. The monorestitution requires the altimetric information in order to rectify vector digitizing of actual entities of interest from used aerial photographs. There exist two ways of using data derived from Laser Scanning: heads-up manual digitizing on the screen using raster images of altimetric data and intensity, and the use of altimetric data for the digital monorestitution of the aerial photographs. The quality of the results was evaluated confronting each procedure to a map obtained by conventional restitution. Comparison was performed computing the difference between the coordinates of the digital entities and the same points in the conventional restitution. Verification was performed using PEC as quality standard.



# **1 INTRODUÇÃO**

No mapeamento, o Sistema de Varredura a Laser aponta para um grande desenvolvimento de técnicas automáticas de extração de feições, facilidades operacionais e aumentando da precisão nos processos produtivos de mapas, como ortofotos e monorrestituição. As técnicas de obtenção de informações espaciais da superfície terrestre baseadas na monorrestituição e ortofotos poderão ser melhores aplicadas no mapeamento urbano com base no modelo digital de superfície derivado do Sistema de Varredura a Laser.

O Sistema de Varredura a Laser representa uma nova tecnologia altamente automatizada na geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT). Segundo ACKERMANN (1999), esta tecnologia teve seus primeiros resultados no final da década de setenta e início da década de oitenta. O funcionamento deste sistema é baseado no seguinte princípio: durante o levantamento, o sistema emite pulsos laser que um espelho dirige para o objeto. O sistema varre a superfície do objeto e registra a distância do sensor até a superfície imageada para cada um dos pulsos emitidos, sendo registrado também o respectivo ângulo de inclinação de cada pulso em relação à vertical.

Inicialmente a aplicação do Sistema de Varredura a Laser era prevista para geração de MDT (Modelo Digital de Terreno), mas atualmente, com a difusão desta nova tecnologia, seu potencial de aplicação está sendo utilizado nas mais diversas áreas como: na engenharia de telecomunicações, onde é utilizado para a obtenção de modelos de elevação que permitem estudos de propagação de ondas e posicionamento de antenas receptoras e transmissoras. Na Engenharia Florestal pode ser aplicada para a determinação de volume e altura de vegetação, estimativa de biomassa além de remoção de cobertura vegetal.

Neste trabalho pretende-se utilizar os dados provenientes do Sistema de Varredura a Laser na monorrestituição de aerofoto convencional na escala de vôo 1:6000. É uma técnica de mapeamento que apresenta maior facilidade

operacional, quando comparada com os métodos baseados na visão estereoscópica.

## **1.1 OBJETIVO**

Tem-se como objetivo geral avaliar o potencial do uso de dados derivados da varredura laser para cartografia urbana.

Como objetivos específicos pretende-se:

- a. Avaliar os erros planimétricos da digitalização manual, sobre a imagem intensidade derivada do varredor laser, de construções e feições ao nível do solo;
- b. Avaliar a contribuição do uso do Modelo Digital de Superfície derivado do Sistema de Varredura a Laser na monorrestituição usando os dados altimétricos de entidades ao nível de solo e elevações.
- c. Verificar a qualidade planimétrica das entidades monorrestituídas comparando os resultados com um mapa estereorestituído na escala 1:2000.
- d. Avaliar efeito de diferentes interpoladores na monorrestituição digital usando o MDS (Modelo Digital de Superfície) derivado dos dados de varredura a laser.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

A monorrestituição é uma técnica de mapeamento de baixo custo. Possui algumas vantagens por trabalhar com aerofotos, além de ser de fácil manuseio ela não necessita de um operador com grande habilidade prática. Em contra partida, para se obter uma monorrestituição com boa qualidade, há necessidade de um bom modelo matemático que represente de forma mais fidedigna o relevo.

Com o desenvolvimento do Sistema de Varredura a Laser, surgiu a possibilidade de se obter a representação da variação do terreno de maneira rápida e com maior precisão. O modelo gerado permite representar a superfície ao nível do solo e as elevações presentes na região, tornando-se uma opção

atrativa para a utilização da monorrestituição no mapeamento de edificações.

O alto grau de detalhe existente numa imagem derivada da varredura laser permite identificar objetos em uma ortoimagem, fato este que aponta para a possibilidade de utilizar estes dados na cartografia. No entanto sua baixa resolução espectral limitam seu potencial. Para aumentar a qualidade de comparação, existe a possibilidade da utilização de aerofotos para a identificação de feições presentes na superfície.

A integração de dados altimétricos do varredor laser e fotografias aéreas é possível através da monorestituição digital. Nesta técnica, as entidades gráficas são digitalizadas na imagem da fotografia aérea e a posição correta dos pontos são calculados com a ajuda dos parâmetros de orientação da câmara e o modelo digital de superfície. Por este motivo, na monorestituição digital há a necessidade de um bom modelo digital de superfície, que pode ser obtido dos dados de varredura a laser. Como os dados derivados do varredor laser fornecem uma representação detalhada da superfície, pretende-se neste trabalho avaliar a utilização dos dados derivados do varredor laser no mapeamento urbano. Para isto será avaliada a vetorização direta sobre as imagens derivadas dos dados do varredor laser, e o uso da monorrestituição de elevações e feições ao nível do solo utilizando o modelo digital de superfície derivado do Sistema de Varredura a Laser.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 MODELO DIGITAL DE TERRENO E MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE**

Para o desenvolvimento deste trabalho, torna-se necessário esclarecer a diferença entre um modelo digital do terreno e um modelo digital de superfície. Segundo HAALA (1999), Modelo Digital do Terreno (MDT) armazena apenas as altitudes dos pontos na superfície do terreno, ao passo que Modelo Digital de Superfície (MDS) é aquele que inclui outros objetos tais como árvores e edificações.

#### **2.1.1 Modelo Digital de terreno**

Um Modelo Digital de Terreno é uma representação numérica de uma porção do terreno, gerado a partir de um conjunto de pontos cuja distribuição e características permitem calcular por interpolação a altitude ou cota de qualquer ponto dentro desta porção de terreno. Esta cota ou altitude ( $Z$ ) é uma função das coordenadas ( $X, Y$ ) dos nós da grade (FERNANDES, 1998).

O processo de geração de um modelo digital do terreno pode ser dividido em três etapas (FELGUEIRAS, 1999):

- Aquisição das amostras ou amostragem;
- Geração do modelo ou modelagem;
- Utilização do modelo ou aplicações.

##### **2.1.1.1 Aquisição das amostras ou amostragem**

É uma das etapas mais importantes de todo o processo e compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno de interesse,

sob a forma de coordenadas tridimensionais. As fontes de amostras podem ser pontos cotados, curvas de nível presentes numa base cartográfica ou dados coletados de fotografias aéreas entre outros. Os mais utilizados para a Fotogrametria são a varredura estereofotogramétrica, a varredura monoscópica e as curvas de nível.

A varredura estereofotogramétrica ou perfilagem é o processo pelo qual o operador, num restituidor analógico, mantém manualmente a marca flutuante em contato com a superfície do modelo enquanto percorre o mesmo ao longo de linhas paralelas, espaçadas de acordo com intervalos pré-definidos, conforme a variação do relevo existente.

A varredura monoscópica é um procedimento apresentado por MITISHITA (1997), implementado no Sistema Monorestituidor Digital. Ele consiste em observar monoscópicamente detalhes fotoidentificáveis que são visíveis nas duas imagens, permitindo a obtenção de pontos homólogos, suas coordenadas fotogramétricas e a determinação matemática das coordenadas tridimensionais através da interseção de retas. Deve ser observado um conjunto de pontos que mostre matematicamente o comportamento altimétrico da região a ser modelada.

Curvas de nível são linhas traçadas no mapa que mostram a localização de pontos na superfície da Terra com a mesma elevação em relação ao nível do mar. As curvas de nível podem ser obtidas por levantamentos topográficos ou pela restituição estereofotogramétrica em meio digital (BURROUGH, 1989).

#### 2.1.1.2 Geração do modelo

Esta etapa envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste com o objetivo de se obter uma representação contínua do fenômeno a partir das amostras. Segundo PETTINATI (1983), a elaboração do modelo de uma superfície consiste no agrupamento dos pontos que descrevem a

superfície real, em unidades lógicas denominadas de estruturas de dados e na determinação de funções de interpolação, de forma que todo o conjunto simule de modo idealizado o comportamento da superfície original.

De maneira geral os pontos amostrados são interligados formando polígonos e estes formam um poliedro. Existem diferentes classes de poliedros, sendo que as duas mais empregadas são a triangulação e a grade regular.

#### **2.1.1.3 Utilização do modelo e aplicações**

Esta etapa compreende os procedimentos de análise executados sobre os modelos digitais. As aplicações podem ser qualitativas, como visualização do modelo, ou quantitativas, como cálculos de volume. Na Fotogrametria o MDT é utilizado na geração de ortofotos e na monorrestituição. Na monorrestituição é utilizado na retificação do arquivo vetorial gerado a partir da digitalização da aerofoto e na ortofoto é utilizado na retificação do píxel.

#### **2.1.2 Modelo Digital de Superfície**

Segundo BURROUGH (1989), Modelo Digital de Superfície (MDS) representa além das informações do terreno as informações das elevações presentes neste mesmo espaço, ou seja, o topo da vegetação e das construções que estejam presentes nesta região.

Este produto pode ser obtido de maneira similar ao MDT, ou seja, primeiramente é necessária a aquisição das amostras representativas do terreno e das elevações presentes. Após é gerado um modelo de representação do fenômeno que envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste a partir das amostras.

Na Fotogrametria e no Sensoriamento Remoto o MDS é utilizado para se obter as informações dos objetos presentes no terreno, como por exemplo, a altura, área e o volume que este objeto está ocupando.

## 2.2 VARREDURA A LASER

O Sistema de Varredura a Laser representa uma tecnologia altamente automatizada na geração de MDT e MDS. Este sistema é um avanço tecnológico importante para a Fotogrametria. Foi introduzido na comunidade cartográfica através das pesquisas realizadas pelo Prof. F. Ackermann do Instituto de Fotogrametria da Universidade de Stuttgart, em 1988 (BALTSAVIAS, 1999).

Seu funcionamento baseia-se na utilização de um feixe de laser (*LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance*) que é emitido em direção aos objetos. Ao atingir a superfície dos objetos, este feixe é refletido e uma parte dele retorna ao sistema. A partir da intensidade do sinal de retorno é possível derivar informações a respeito da natureza da superfície do objeto, mas o dado mais relevante é o tempo decorrido entre a emissão do feixe e o registro do retorno pois, a partir dele, informações sobre a distância entre o sensor e o objeto podem ser calculadas. Este tipo de sistema também é chamado de LIDAR (*Light Detection And Ranging*) ou LADAR (*Laser Detection And Ranging*). A nomenclatura para o sistema laser ainda não foi bem definida, e depende dos autores, mas a LADAR é a mais utilizada por caracterizar o uso do laser (WEHR & LOHR, 1999).

Quase todos os sistemas são compostos por três componentes básicas: uma unidade de medição laser propriamente dita, encarregada de emitir e receber o sinal laser, um sistema de varredura óptico-mecânico e uma unidade de registro de medições de apoio (BALTSAVIAS, 1999).

### 2.2.1 Tipos de Sistema de Varredura a Laser

Existem dois tipos de Sistema de Varredura a Laser segundo WEHR & LOHR (1999): o estático onde o sensor está parado em relação ao alvo e o dinâmico ou também conhecido como sistema aerotransportado, que se desloca em relação ao alvo. Neste trabalho, os dados utilizados foram obtidos através de

um sistema dinâmico.

#### 2.2.1.1 Sistema Estático

Existem dois modos de medida a laser com sistemas estáticos: *ranging* e *triangulation* (BOEHLER, 2002). Os dois modos diferem-se no princípio de funcionamento. O *ranging* possui um dispositivo luminoso que emite pulsos em direção ao objeto. Este pulso retorna em direção ao sensor, sendo medido o tempo decorrido da saída do pulso até o seu retorno ao sensor, o que torna possível calcular a distância do objeto até o sensor.

O princípio do modo *triangulation* está baseado na fototriangulação. Um pulso de laser é emitido pelo sensor e seu retorno é captado e registrado por câmaras digitais acopladas ao sistema. O ângulo de varredura dos pulsos é registrado a cada pulso emitido e conhecendo-se a base fixa entre o emissor laser e a(s) câmaras(s), por meio de um processo de calibração determina-se a posição dos pontos refletidos pelo objeto (BALTSAVIAS, 1999).

#### 2.2.1.2 Sistema Dinâmico

O sistema dinâmico é um sistema aerotransportado composto por um Sistema de Posicionamento, um Laser e um Sistema Inercial. Ele utiliza um feixe laser de alta potência e corretamente direcionado, garantindo a qualidade da distância medida. Este feixe deve ser coerente no espaço e no tempo (MASAHARU & OHTSUBO, 2002).

A posição do sensor no momento da medição de cada ponto é determinada mediante um sistema de GPS diferencial (DGPS). Um segundo sistema de apoio, um sistema de medição de inércia (SMI) é encarregado de calcular a inclinação do sensor nas três direções (*roll* ( $\omega$ ), *pitch* ( $\varphi$ ), *heading* ( $\kappa$ )), (WEHR & LOHR, 1999).

A precisão do laser dinâmico fica em torno de 15 cm em planimetria e

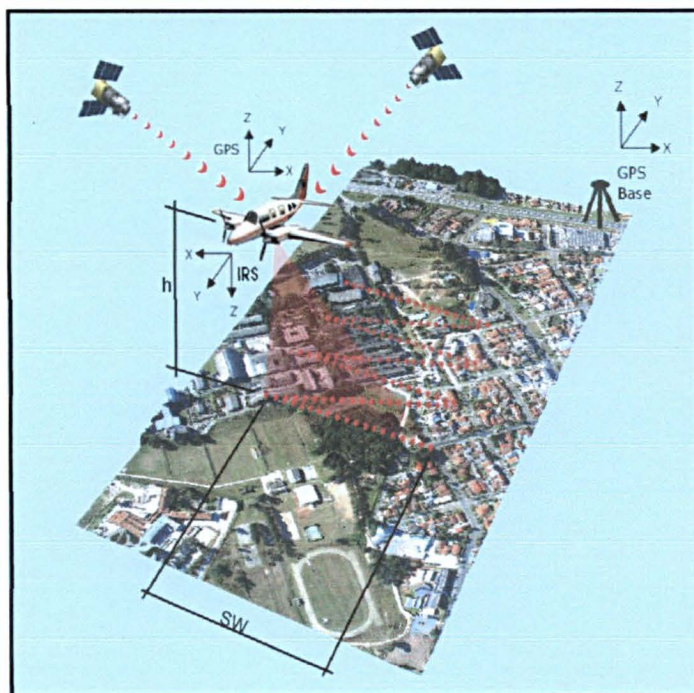


10 cm em altimetria, por isto os sistemas de apoio devem ter uma precisão igual ou maior (WEHR & LOHR, 1999). Estes conjuntos são armazenados e medidos simultaneamente à medição da distância pelo sistema laser.

### 2.2.2 Funcionamento do Sistema de Varredura a Laser

O princípio básico de funcionamento deste sistema é a obtenção de registros contínuos de coordenadas (X,Y,Z) espaciais, as quais constituem os elementos primários para modelagem do terreno. A figura 01 mostra o princípio básico de funcionamento do Sistema de Varredura a Laser do equipamento ALTM2050 da OPTECH, pertencente ao LACTEC-UFPR (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento). Ele é composto de uma unidade de medição laser, um sistema de varredura óptico-mecânico e uma unidade de registro de medições de apoio.

FIGURA 01 – FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE VARREDURA A LASER



FONTE: LACTEC (2003)

#### 2.2.2.1 Pulsos do Sistema de Varredura a Laser

O Sistema de Varredura a Laser possui um dispositivo interno que é responsável pela geração, direcionamento e recepção de pulsos gerados. O pulso é gerado pelo estímulo de um cristal sintético para a emissão da radiação amplificada da luz. O tipo de cristal em geral utilizado é denominado Nd:YAG (*Neodimium: Yttrium Aluminum Garnet*) e seu estímulo varia entre 10-15 ns. A maioria dos sistemas laser operam numa faixa do espectro eletromagnético variando entre 0,8  $\mu\text{m}$  e 1,6  $\mu\text{m}$  (STEINLE & BAHR, 1999)..

Os pulsos, após terem sido gerados são enviados para o espelho de varredura onde este os orienta em direção aos objetos, recebendo o sinal de retorno e direcionando este sinal para o receptor. O sinal recebido é transformado em digital e por meio de um conversor é suavizado através de um filtro de suavização de sinais.

A energia do laser é emitida na região do espectro do infravermelho, que é invisível a olho nu, mas tem alta potência e por isto é prejudicial à visão humana. Para evitar danos a seres humanos, algumas especificações podem ser pré-estabelecidas, como por exemplo, a altura de vôo, a energia do pulso e a frequência de operação para interromper o sistema (STEINLE & BAHR, 1999).

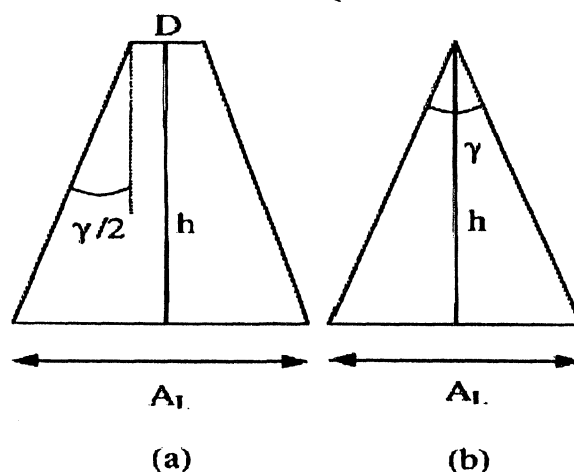
##### 2.2.2.1.1 Divergência do Pulso

Uma característica física do pulso laser ao se propagar na atmosfera é a divergência sofrida, ao sair do sistema que o emite. Devido à divergência ser muito baixo em relação à altura de vôo, o pulso incide no objeto com um diâmetro muito pequeno. Segundo BRANDALISE (2002), o ângulo de divergência pode ser ajustado por meio de elementos ópticos apropriados do transmissor (conjunto de lentes) para um ponto projetado de dimensões controladas de acordo com a superfície levantada.

### 2.2.2.1.2 Diâmetro do pulso e largura da faixa

Outro fator que constitui uma característica do pulso é o diâmetro da projeção do feixe no terreno (*footprint*). Ele está diretamente relacionado com a divergência sofrida ao se propagar no meio. Segundo BALTSAVIAS (1999) o diâmetro do pulso pode ser dado pela relação de triângulos mostrada na figura 02.

FIGURA 02 – DIÂMETRO DO PULSO LASER. (A) CONSIDERANDO O DIÂMETRO DE ABERTURA D; (B) CONSIDERANDO O DIÂMETRO DE ABERTURA MUITO PEQUENO.



FONTE: BALTSAVIAS (1999)

No primeiro caso, consideram-se os diâmetros de abertura do sistema laser segundo a relação mostrada na equação 01 (BALTSAVIAS, 1999):

$$A_L = D + 2h \tan\left(\frac{\lambda}{2}\right) \quad (01)$$

onde:

$A_L$  é o diâmetro do pulso no terreno;

D é o diâmetro de abertura do sistema Laser;

$\lambda$  é o ângulo de divergência do pulso laser, dado em radianos;

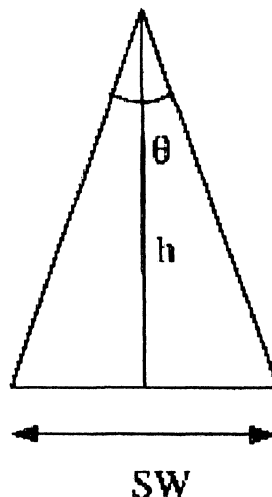
h é a altura de voo.

No segundo caso, considerando D muito pequeno em relação a  $A_L$ , o que ocorre geralmente na prática, a equação 01 pode ser simplificada como:

$$A_L = 2h \tan\left(\frac{\lambda}{2}\right) \quad (02)$$

A largura da faixa varrida pode variar em função da topografia e pode ser calculada para diferentes tipos de terrenos. Para terrenos planos, como mostra o esquema apresentado na figura 03, e a largura da faixa é determinada pela equação 03.

FIGURA 03 – LARGURA DA FAIXA PARA TERRENOS PLANOS



FONTE: BALTSAVIAS (1999)

$$SW = 2h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (03)$$

onde:

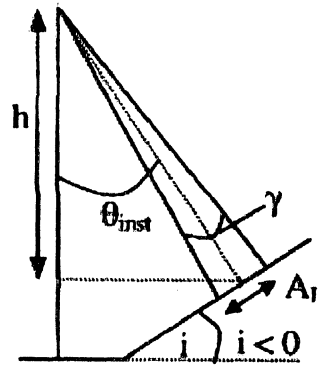
$\theta$  é o ângulo de varredura do sistema;

SW (*Swath Width*) é a largura da faixa.

Nota-se que as equações 02 e 03 são parecidas. A diferença entre elas está no ângulo utilizado. A equação 02 utiliza o ângulo de divergência do pulso laser para calcular o diâmetro do pulso no terreno. A equação 03 utiliza o ângulo de varredura do sistema para calcular a largura da faixa imageada pelo sistema.

Para terrenos inclinados BALTSAVIAS (1999) apresenta a solução demonstrada na figura 04 e equação 04:

FIGURA 04 – DIÂMETRO DO PULSO LASER PARA TERRENOS INCLINADOS



FONTE: BALTSAVIAS, 1999

sendo:

$$A_L = \frac{a 2h \sin\left(\frac{\lambda}{2}\right)}{\cos\left(\theta - \frac{\lambda}{2}\right)} \quad (04)$$

$$a = \left[ \cos(e) + \sin(e) \tan\left(e + \frac{\lambda}{2}\right) \right]$$

$$e = \theta + i$$

onde:

$i$  é a inclinação da faixa;

$\theta$  é o ângulo de varredura do sistema.

#### 2.2.2.1.3 Resolução e precisão do pulso

O Sistema de Varredura a Laser é baseado na medida da distância entre o sensor e o objeto e, com base na medição do intervalo entre a emissão do sinal e a recepção do retorno (Figura 05). Segundo BALTSAVIAS (1999), este tempo é medido por um contador de intervalo relativo a um ponto específico no pulso, por exemplo, a extremidade principal do lado ascendente do pulso, ou seja, a sua borda. Caso a borda não seja bem definida, o tempo é medido para um ponto na extremidade principal onde a voltagem do sinal adota um valor de limiar predeterminado. Erros podem acontecer se a voltagem da magnitude, transmitida e recebida dos pulsos não for ajustada ao mesmo valor antes de serem enviados

ao contador de intervalo de tempo, isto é, se receberem pulsos com amplitude muito baixa, o tempo medido  $t$  vai ser muito longo.

De acordo com a figura 05, a distância entre o sensor e o objeto pode ser calculada a partir do tempo entre o pulso emitido e recebido pela equação 05

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \quad (05)$$

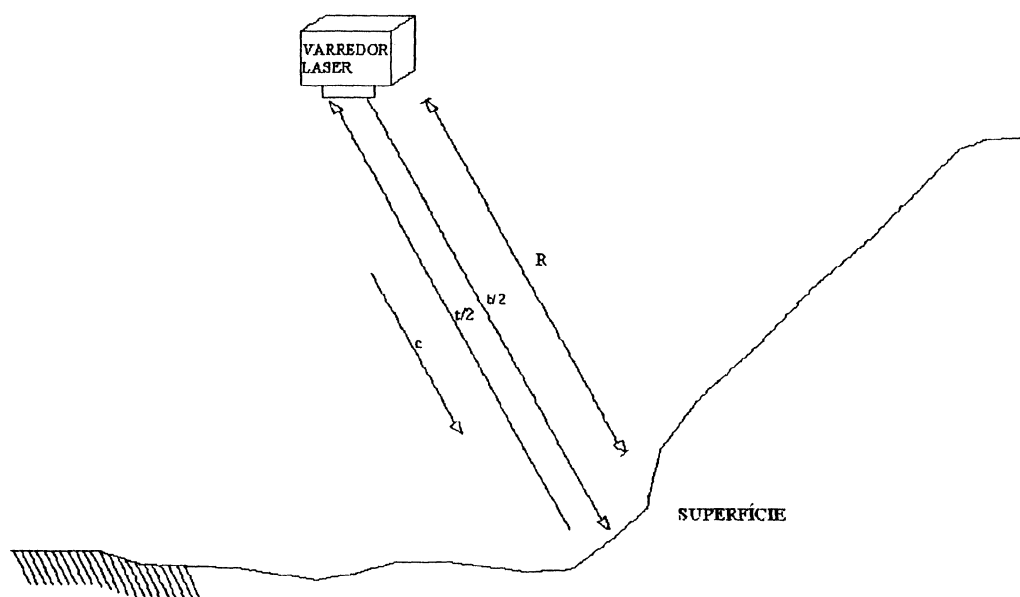
onde,

$R$  - é a distância entre a superfície do objeto e o sensor;

$c$  - é a velocidade da luz;

$t$  - tempo entre o pulso transmitido e recebido.

FIGURA 05 – DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE O SENSOR E A SUPERFÍCIE



Segundo WEHR & LOHR (1999), o intervalo de medida entre os pulsos emitidos e recebidos pode ser obtido através do sistema-pulso e o sistema ondas contínuas. Para o sistema-pulso, este intervalo é obtido através da equação (05). Para fins de semelhança com a fonte, adota-se como o identificador de intervalo a letra  $R$ , que vem do inglês *Range*, onde  $c$  é a velocidade da luz e  $t$  é o

intervalo.

Com isto, o intervalo máximo ( $R_{\max}$ ), a máxima distância que pode ser medida, e a precisão das medidas ( $\sigma_R$ ) são obtidos pelas seguintes equações 07 e 08 respectivamente:

$$\Delta R = \frac{(c\Delta t)}{2} \quad (06)$$

$$R_{\max} = \frac{ct_{\max}}{2} \quad (07)$$

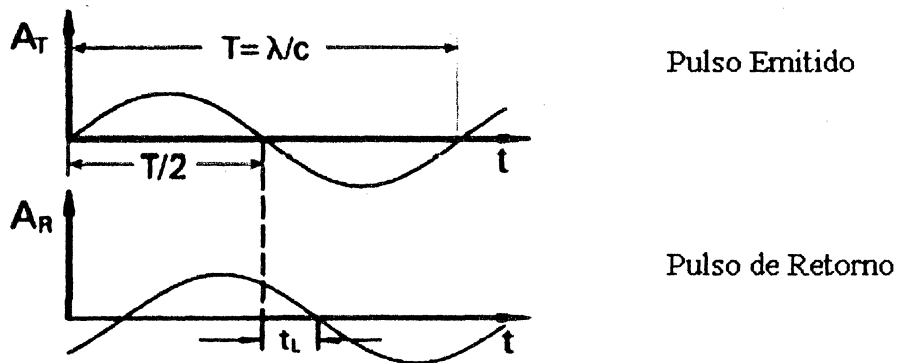
$$\sigma_R = \frac{ct}{2} \frac{1}{\sqrt{(S/N)}} \quad (08)$$

onde S/N representa a relação sinal/ruído.

Para não ocorrer ambigüidade na leitura do sinal no contador de intervalo, o segundo pulso é enviado após o retorno do primeiro pulso. Existem dois fatores básicos que devem ser considerados para que não ocorra ambigüidade dos sinais: número de bits do contador de intervalo e taxa de pulso (STEINLE & BAHR, 1999).

Para o Sistema OC (Ondas Contínuas), o intervalo é medido através de sinais senoidais, modulando-se a intensidade. O sinal recebido sofre um pequeno atraso  $t_l$ . Como o período T é conhecido e tempo de deslocamento do pulso é diretamente proporcional a diferença de fase ( $\phi$ ), entre o sinal recebido e emitido, WEHR & LOHR (1999) apontam as seguintes soluções baseados na figura 06:

FIGURA 06 – SISTEMA OC DE PULSOS SENOIDAIS



FONTE: WEHR & LOHR (1999)

$$t = T \frac{\varphi}{2\pi} + nT \quad (09)$$

Sendo  $n$  o número de comprimentos de onda inteiros, que podem ser desprezados, e  $T$  o período do sinal inversamente proporcional à frequência  $f$ . Com isto  $t_s$  é dado pela equação 10.

$$t_s = \frac{\varphi}{2\pi} \frac{1}{f} \quad (10)$$

Então a distância  $R$ , e a resolução do intervalo entre o sensor e o objeto modulando-se o sinal contínuo podem ser obtidas pelas equações 11 e 12 para o sistema – OC através da medida  $\varphi$ .

$$R = c \frac{\varphi}{2\pi} T = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \varphi \quad (11)$$

$$\Delta R = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \Delta \varphi \quad (12)$$

A distância máxima e a precisão da medida podem ser determinados pelas equações (13) e (14) respectivamente:

$$R_{\max} = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \Delta \varphi \quad (13)$$

$$\sigma_R = \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \frac{1}{\sqrt{(S/N)}} \quad (14)$$

onde,

$\lambda_g$ : comprimento de onda grande;

$\lambda_p$ : comprimento de onda pequeno.

Segundo BALTSAVIAS (1999), um pulso de laser do sistema – OC emprega dois valores de frequência: 1Mhz e 10 MHz. A frequência 1Mhz corresponde a 300 m de comprimento de onda. Isto significa que 150 m são de ambigüidade.

A relação sinal/ruído (S/N), pode ser obtida excluindo-se algumas variáveis como fontes de ruídos, por exemplo. Então a relação S/N fica de acordo com a equação (15).



$$S / N = \frac{Nr}{\sqrt{F(Nr + Nb) + Nd}} \quad (15)$$

Onde o sinal de fotoelétrons (Nr), fotoelétrons de fundo (Nb) e os ruídos dos fotoelétrons obtidos no escuro (Nd) estão presentes na equação. O termo F da equação (15) é uma função de Nr e Nb. O termo Nr é obtido através da equação (16),

$$Nr = \eta \frac{Er}{Pv} \quad (16)$$

onde

$\eta$ : eficiência do detector (medido em *Quantum*);

P: constante de Planck ( $6.326 \times 10^{-34}$  Js);

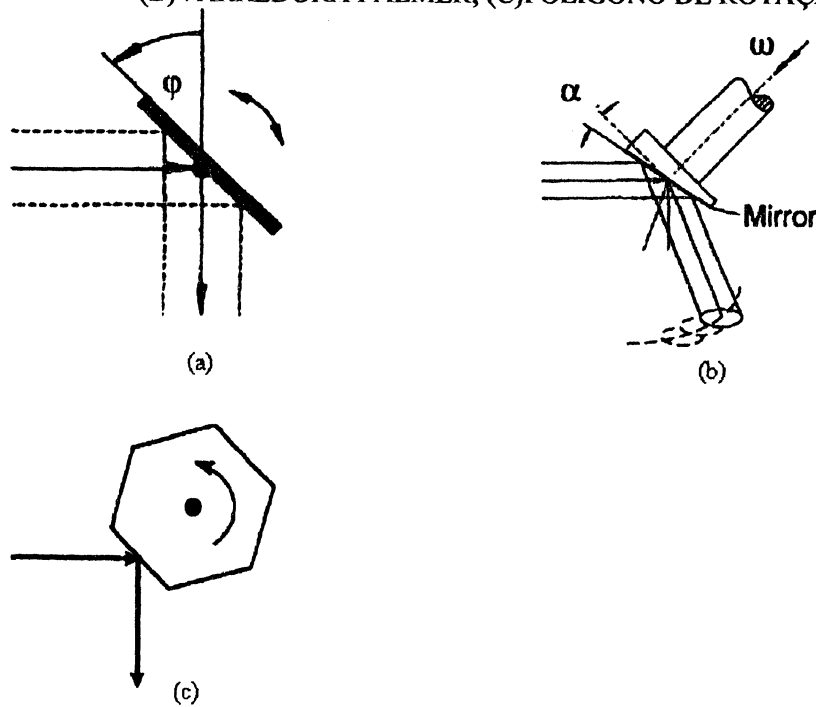
$Er = P (c/\lambda)$ ;

v: frequência do Laser.

#### 2.2.2.2 Sistema de varredura de espelho

O sistema de varredura pode ser uni ou bidirecional. Os mecanismos de varredura utilizados nos levantamentos aéreos com Varredura a Laser são: o espelho oscilador, a varredura *Palmer* e o Polígono de rotação. Os espelhos oscilantes (Figura 07a) produzem geralmente uma linha em zig-zag, os espelhos de *Palmer* (Figura 07b) produzem modelos elípticos e os espelhos de polígonos de rotação (Figura 07c) produzem linha paralelas (WEHR & LOHR, 1999). Existe outro tipo de sistema de varredura utilizado, é o sistema de fibra óptica (usado apenas em sistemas da TopoSys).

FIGURA 07 – MECANISMOS DE VARREDURA. (A) ESPELHO OSCILADOR; (B) VARREDURA PALMER; (C) POLÍGONO DE ROTAÇÃO



FONTE: ADAPTADO DE WEHR & LOHR 1999

O mecanismo de varredura da OPTECH, utilizado neste trabalho, é o de espelho oscilante. A varredura é feita no sentido transversal à direção de voo com um ângulo de abertura especificado pelo operador. Este ângulo de abertura permite a determinação da largura de faixa abrangida pela varredura do sistema, enquanto o movimento da aeronave permite a cobertura na direção de voo. A densidade dos pontos medidos na superfície depende da velocidade da aeronave, da frequência que os pulsos são repetidos, da altura de voo e do ângulo de varredura (WEHR & LOHR, 1999). A relação entre a densidade dos pontos com suas variáveis é mostrada na equação 17,

$$d = \frac{h}{\cos^2(\theta)} \frac{\theta}{frp} \quad (17)$$

onde:

d: densidade dos pontos  $m^2$ ;

$\theta$ : ângulo de varredura;

frp: frequência de repetição dos pulsos;

h: altura da aeronave em relação ao objeto.

#### 2.2.2.3 Sistema de posição e orientação

A posição 3-D de um ponto determinado por pulsos do Sistema de Varredura a Laser só pode ser computada se a posição e orientação do sistema forem referenciadas a um sistema de coordenadas conhecidas, por exemplo, o WGS84. Assim, para obter medidas precisas de pontos em um determinado sistema de coordenadas, o Sistema de Varredura a Laser deve ser apoiado por um sistema de posição e orientação – POS (*Position and Orientation System*) (WEHR & LOHR, 1999).

A posição do sensor na hora da medição de cada ponto é determinada mediante um sistema de GPS diferencial (DGPS), encarregado de calcular a posição da plataforma no espaço. Um segundo sistema de apoio, um Sistema de Medição Inercial (SMI) é encarregada de calcular a inclinação do sensor nas três direções. Na fase de pós-processamento, as medidas LASER com seus respectivos ângulos, os dados de GPS e dados de navegação inercial são combinados para determinar a posição dos pontos varridos na superfície terrestre. Para garantir boa qualidade do resultado, estes dados devem estar sincronizados BEHAN (2000).

O sistema possui dois tempos distintos: o tempo GPS e o tempo do computador PC1 que está relacionada com os dados do pulso laser registrado. Para a sincronização dos dados é utilizado um módulo de aplicativo que armazena os dados do laser com um tempo adicional controlado pelo interruptor. No início de cada varredura, o tempo do computador local PC1 é disparado e paralelamente a esta atividade os tempos do PC1 e GPS são armazenados em arquivos separados. Como o sinal do receptor GPS ativa um interruptor, ambos

os tempos são armazenados no mesmo instante (WEHR & LOHR, 1999). Utilizando-se o arquivo que contém os dados brutos, os mesmos podem ser pós-processados separadamente. A sincronização disponibiliza a correção e a determinação de possíveis erros de tempo entre o tempo GPS e o tempo do PC1.

#### 2.2.2.4 Processamento dos dados

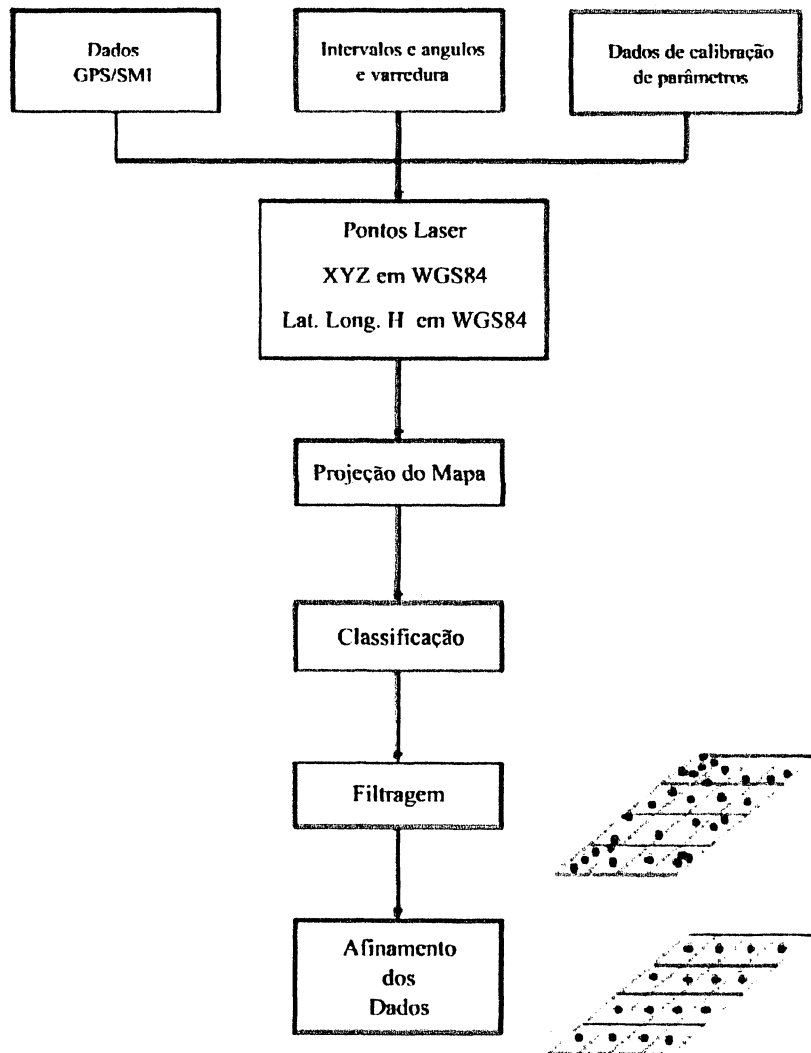
Devido ao grande número de informações que o Sistema de Varredura Laser gera, é necessário que estes dados sejam processados a fim de modelar a superfície e obter as informações de intensidade da imagem, por exemplo. Os dados que o sistema fornece são da posição tridimensional (DGPS), a atitude da aeronave (SMI), a medida do laser (intervalo de tempo) e o ângulo de varredura.

Para transformar os dados laser num sistema de coordenadas local, devem ser considerados alguns parâmetros: ângulos  $\omega$ ,  $\phi$ , e  $\kappa$  (com origem no SMI); posição dos dados laser em relação ao SMI; e posição do SMI em relação ao GPS (WEHR & LOHR, 1999).

Na fase de processamento dos dados, segundo a figura 08, os dados brutos são combinados para calcular as coordenadas tridimensionais dos pontos e a seguir ocorre a transformação dos pontos para o sistema WGS84, resultando numa nuvem de pontos aleatoriamente distribuídas em posição e elevação. Nesta fase os dados podem ser filtrados e separados em pontos do terreno e pontos de elevação. A filtragem é realizada com dados brutos ou através de uma grade regular interpolada (influenciada pelos erros de interpolação) (BEHAN, 2000).

Segundo WEHR & LOHR (1999), um processo de redução dos dados é necessário após a etapa de filtragem e interpolação, pois a quantidade de dados envolvidos é muito grande e torna o processo lento. O tempo de processamento para gerar um MDS por meio de dados laser é basicamente três vezes maior que o tempo de aquisição.

FIGURA 08 – ETAPAS DO PROCESSAMENTO



FONTE: ADAPTADO DE WEHR & LOHR 1999

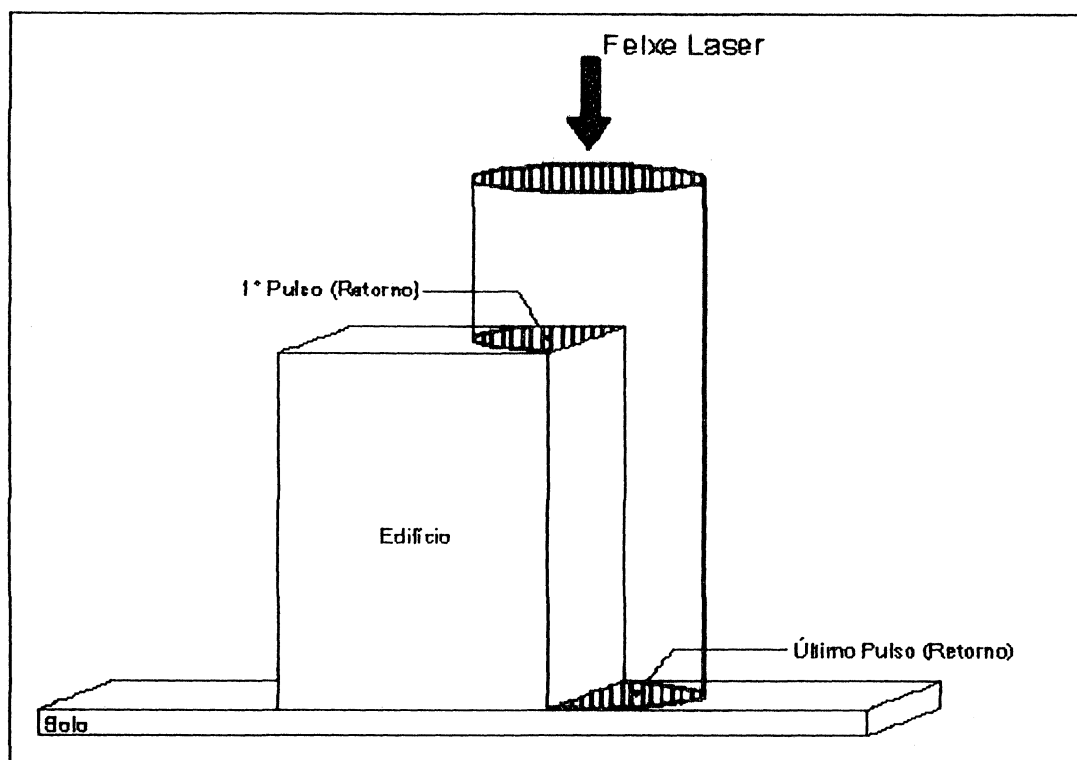
Geralmente a largura das faixas geradas pelo sistema laser varia de 70m a 800m. Segundo BEHAN (2000), no caso de áreas grandes, as faixas devem ser tomadas paralelamente e com sobreposição, sendo necessária a montagem, do modelo entre as faixas adquiridas, além do processo de interpolação.

### 2.2.3 Características do Sistema de Varredura a Laser

O tamanho e a superfície dos objetos detectáveis, bem como o material

que compõe esta superfície determinam a porcentagem de pulsos que retornam ao sensor. Esta característica é interessante, quando se leva em consideração a diferença de penetração que pode existir em um único pulso (BEHAN, 2000). Alguns sistemas laser possuem como característica a medição de diferentes retornos do sinal emitido, refletido por diferentes objetos dentro da projeção do feixe no terreno (*footprint*). É possível medir o primeiro e o último retorno do pulso (*first/last pulse*), ou até pode-se medir toda a variação do retorno, se for necessário. O feixe, ao incidir na superfície da Terra, não atinge um único objeto e pode ser refletido por diferentes pontos localizados a diferentes distâncias do sensor, como é mostrado na figura 09. Sendo assim, o ponto mais próximo ocasionará um pulso que retorna mais rapidamente. Já o ponto mais distante origina um retorno mais demorado (MASAHARU & OHTSUBO, 2002).

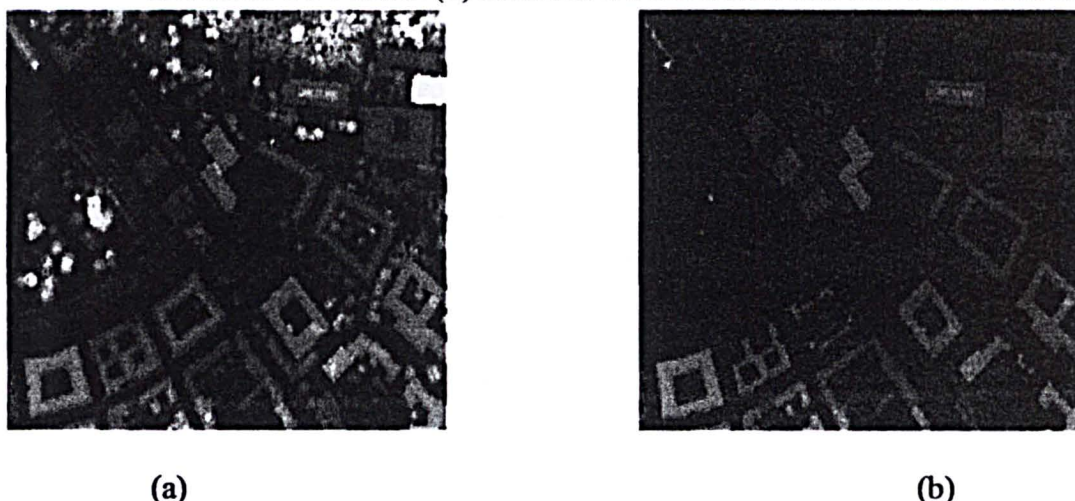
FIGURA 09 – DEMONSTRAÇÃO DO PRIMEIRO E ÚLTIMO PULSO



FONTE: LACTEC (2003)

Este tipo de característica permite a distinção entre as elevações presentes sobre o terreno, como é mostrado o exemplo na figura 10.

FIGURA 10 – IMAGENS RETORNOS DO PULSO LASER. (A) IMAGEM DO PRIMEIRO RETORNO DO PULSO. (B) IMAGEM DO SEGUNDO RETORNO DO PULSO.



Pode-se verificar visualmente que alguns feixes conseguem atravessar a copa das árvores, atingindo o terreno. Os pontos onde a superfície não é coberta por outros objetos, como ocorre nos telhados, um único feixe de retorno é captado, ou seja, o primeiro e o último pulso são iguais.

A tabela 01 apresenta as principais características do Sistema de Varredura a Laser, OPTECH 2050, utilizado neste trabalho.

TABELA 01 - CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO LASER DO LACTEC

Descrição do sistema	Característica
Modelo do equipamento	ALTM 2050
Fabricante do equipamento	Optech
Ano de fabricação	2002
Frequência do pulso laser	50.000 pulsos por segundo – 50kHz
Frequência de varredura	Variável de 1Hz a 100Hz
Ângulo de varredura	Variável 0° a 40°
Sistema Inercial (IMU) / GPS	Applanix
Capacidade de armazenamento	36 GigaBytes
Software da operação de voo	ALTM-NAV (Optech)
Software do processamento	REALM (Optech)
Tipo de coleta de dados	Primeiro e último retorno do pulso
Densidade de pontos	Variável de 400.000 de 4.000.000
Número de pontos por m <sup>2</sup>	Variável de 1 a 4 pontos
Precisões	50 cm na planimetria e 15 cm na altimetria

FONTE: OPTECH ABOUT ALTM SYSTEM.

As figuras 11a e 11b mostram o equipamento ALTM 2050 da OPTECH utilizado no levantamento dos dados de varredura a laser utilizados neste trabalho.



FIGURA 11 – EQUIPAMENTO ALTM 2050 DA OPTECH: (A) PARTE FRONTAL E (B) PARTE POSTERIOR



(a)



(b)

#### 2.2.3.1 Erros

Como todo método de aquisição de informações sobre a superfície, o Sistema de Varredura a Laser possui erros oriundos do pulso emitido, do sistema de orientação (GPS) e atitude da aeronave (SMI), erros caracterizados pela divergência do pulso. Estes erros sistemáticos podem ser:

- a. Erros oriundos da refração (Efeito da Refração) – os pulsos laser emitidos e refletidos são afetados pelas diferentes camadas existentes na atmosfera. Esta influência aumenta com a altura de voo da aeronave e depende das condições atmosféricas. O efeito atmosférico no pulso é condicionado ao comprimento de onda utilizado pelo sistema (MASS, 2002).
- b. Erros oriundos da atitude (SMI) – segundo BRANDALISE (2002), as diferenças resultantes do sistema inercial dependem do fabricante, geralmente se encontram na ordem de  $1/100^\circ$ , que a uma altura de voo de mil metros correspondem a uma qualidade geométrica semelhante a do GPS. A precisão do sistema inercial no pós-processamento DGPS varia de cinco a trinta centímetros (erro médio quadrático).
- c. Erros de posicionamento GPS – os erros de posicionamento devido ao GPS



podem ser os intrínsecos relativos às frequências, à geometria dos satélites e à sua órbita. Têm também os erros ditos externos que estão relacionados aos pontos de controle e aos erros operacionais (MASS, 2002).

- d. Erros caracterizados pela divergência do pulso – este tipo de erro são considerados principalmente quando são utilizadas grandes divergências. Os erros de divergência são caracterizados através de uma subtração do primeiro e do segundo pulso. Estas pequenas diferenças são chamadas de bordas. As bordas das edificações do segundo retorno são mais estreitas que as do primeiro retorno. Isto se explica pelo fato do primeiro retorno indicar o ponto sobre a lateral da edificação e o segundo retorno indicar que o pulso atingiu o solo. Isto se deve ao fato de quando o pulso atinge a borda da edificação, dependendo do tamanho do diâmetro, pode interceptar parcialmente a borda e parcialmente o solo (MASAHARU & OHTSUBO, 2002).
- e. Erros sistemáticos – podem ocorrer quando a posição e orientação relativa dos três sistemas, GPS, unidade inercial e o varredor laser, não é determinada com precisão. Os três equipamentos estão instalados no avião em locais diferentes. A antena GPS fica na carenagem externa da aeronave enquanto o sensor e a unidade inercial encontram-se dentro dela. Mesmo ficando no interior da aeronave, estes dois últimos dispositivos não ocupam o mesmo espaço. A unidade inercial é colocada geralmente sobre o sensor, transformações de rotação e translação relativas são necessárias para compatibilizar os dados captados pelos três sistemas, bem como transformar os dados para o sistema de referência no espaço objeto. Os erros decorrentes destas transformações afetam a estimativa da posição dos pontos medidos pelo varredor laser (WEHR & LOHR, 1999).

## 2.3 MONORRESTITUIÇÃO DIGITAL

A monorrestituição digital pode ser definida como um procedimento fotogramétrico que possibilita a obtenção de mapeamento planimétrico digital a partir da digitalização vetorial (monoscópica) de entidades contidas numa única aerofoto (MITISHITA, 1997). A falta de visão estereoscópica para corrigir o deslocamento da imagem provocada pela variação da altura dos objetos na projeção central é compensada pelo uso de um MDT.

Foi MAKAROVIC (1973) quem idealizou o processo de monorrestituição digital, utilizando as equações de colinearidade inversas e o modelamento matemático da superfície para transformar as coordenadas fotogramétricas observadas nas aerofotos em coordenadas de terreno no referencial geodésico cartesiano tridimensional local. A obtenção do mapa se dá quando estas coordenadas são transformadas para o referencial de um sistema de projeção cartográfica.

Utilizando-se de sistemas de computação gráfica (C.A.D.) para a obtenção de pontos necessários a materialização das entidades e suas coordenadas no referencial fotogramétrico, pode-se empregar técnicas de digitalização vetorial em aerofotos analógicas numa mesa digitalizadora ou aerofotos digitais no formato “*raster*” na tela de vídeo do computador (MITISHITA, 1997).

A seguir serão descritas as etapas envolvidas no processo de monorrestituição digital de aerofotos em formato “*raster*”.

### 2.3.1 Orientação Interior da Aerofoto

A orientação interior permite a reconstrução do feixe perspectivo que gerou a fotografia (ANDRADE, 1998). A orientação interior analítica se utiliza de processos matemáticos para a sua realização. Utilizando o modelo matemático da transformação de coordenadas do referencial instrumental para o fiducial e a

correção matemática dos erros sistemáticos, obtém-se as coordenadas dos pontos no referencial fotogramétrico. Desta forma, a orientação interior pode ser subdividida em cinco etapas básicas.

#### 2.3.1.1 Parâmetros Geométricos da câmara

O processo de orientação interior analítica necessita dos parâmetros que definem a geometria projetiva da aerofoto digital a ser trabalhada. Estes parâmetros fazem parte do certificado de calibração da câmera aérea (ANDRADE, 1998):

- Distância focal calibrada;
- Número de marcas fiduciais e suas coordenadas no referencial fiducial;
- Coordenadas do ponto principal no referencial fiducial;
- Parâmetros de modelagem da distorção radial simétrica e descentrada;
- Parâmetro da correção da refração fotogramétrica.

Os parâmetros principais para a aplicação da metodologia de monorrestituição de câmaras aerofotogramétricas são a distância focal e as coordenadas das marcas fiduciais. Os outros parâmetros são utilizados para o refinamento do procedimento.

#### 2.3.1.2 Observações das marcas fiduciais.

Nesta etapa observam-se as marcas fiduciais no sistema de máquina (neste trabalho o utilizado foi o sistema de computação gráfica) e obtém-se as coordenadas das marcas no referencial de máquina (referencial do plano gráfico). Estas informações são necessárias para a obtenção dos parâmetros de transformação do referencial instrumental para o referencial fiducial.

#### 2.3.1.3 Parâmetros de transformação entre o sistema CAD e o fiducial;

Com as coordenadas das marcas fiduciais no referencial de CAD, em UOR (“*unit of resolution*”, sistema de resolução interno do *MicroStation*), e no referencial fiducial, determina-se por técnicas de ajustamento os parâmetros de transformação entre estes dois referenciais.

A transformação afim geral no plano (Equação 18) é o modelo matemático mais utilizado para modelar as deformações do trabalho do filme com 4 marcas fiducias:

$$\begin{aligned}x_f &= a_1 \cdot x_i + a_2 \cdot y_i + x_0 \\y_f &= a_3 \cdot x_i + a_4 \cdot y_i + y_0\end{aligned}\tag{18}$$

onde:

$a_i$  ( $i=1,4$ ) – parâmetros de transformação;

$x_f, y_f$  – coordenadas fiduciais;

$x_0, y_0$  – coordenadas do ponto principal;

$x_i, y_i$  – coordenadas do referencial instrumental.

Trabalhando-se com fotografias que possuem oito marcas fiduciais, é comum utilizar o modelo matemático da transformação projetiva no plano ou do modelo matemático da transformação polinomial do 2º Grau (ANDRADE, 1998).

Observando-se as marcas fiduciais de uma aerofoto, obtêm-se as suas coordenadas no referencial de CAD. Tendo-se, a partir do certificado de calibração da câmara as coordenadas das marcas fiduciais no referencial fiducial, obtêm-se as condições necessárias para a determinação dos parâmetros de transformação empregando o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (WOLF, 1983).

Após a determinação dos parâmetros, dentro das precisões estabelecidas, as observações realizadas no referencial de CAD, são transformadas para o referencial fiducial com a aplicação do modelo.

Na transformação do sistema de máquina e o sistema fiducial é realizada a correção do erro sistemático denominado distorção de lentes,

conforme o item 2.3.1.5.1.

#### 2.3.1.4 Transformações entre sistema fiducial e fotogramétrico

Conhecendo-se as coordenadas de um ponto qualquer no referencial fiducial, pode-se determinar as coordenadas deste ponto no referencial fotogramétrico. Uma vez que estes sistemas são paralelos, o modelo matemático desta transformação representa uma translação no plano, conforme a equação 19.

$$\begin{aligned}x_p &= x_f - x_0 \\y_p &= y_f - y_0\end{aligned}\tag{19}$$

Como a equação fundamental da monorrestituição é a equação de colinearidade “inversa”, ela pressupõe o alinhamento do centro perspectivo, ponto imagem e ponto objeto. Na prática isto não ocorre devido aos erros sistemáticos. Assim a equação de colinearidade, depende de que as coordenadas fotogramétricas estejam corrigidas destes erros.

#### 2.3.1.5 Correção dos erros sistemáticos devido as distorções das lentes e refração fotogramétrica.

A equação de colinearidade está fundamentada na condição de colinearidade do ponto imagem, centro de projeção e ponto objeto. A utilização prática das equações de colinearidade, exige que as observações fotogramétricas sejam corrigidas dos erros sistemáticos que afetam a condição de colinearidade, a fim de adequá-las ao modelo matemático (WOLF, 1983).

##### 2.3.1.5.1 Trabalho do filme

Este erro desloca o ponto imagem devido as deformações provenientes das diferenças existentes de temperatura, pressão, umidade e forma de planificação do filme, entre os instantes de tomada e da utilização prática da

aerofoto (MITISHITA, 1997). A modelagem matemática deste erro sistemático é realizada na transformação das observações do referencial instrumental (CAD) para o referencial fiducial.

#### 2.3.1.5.2 Distorção de lentes

Um sistema de lentes pode sofrer cinco tipos de aberrações causadas por processos de fabricação das lentes: aberração esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo e distorção. As quatro primeiras estão relacionadas com a qualidade da imagem, enquanto que a distorção provoca o deslocamento da imagem. No presente trabalho serão discutidos somente as distorções, uma vez que este erro sistemático é o de maior interesse para a Fotogrametria a fim de minimizar os efeitos do deslocamento da imagem (WOLF, 1983).

**Distorção radial simétrica** - pode ser considerada como sendo uma parcela não desejável sofrida por um raio de luz ao atravessar um sistema óptico (ANDRADE, 1998). A correção da distorção radial simétrica, é realizada com a aplicação da seguinte formulação:

$$x' = \left(1 - \frac{\delta r}{r}\right)x \quad (20)$$

$$y' = \left(1 - \frac{\delta r}{r}\right)y \quad (21)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots$$

onde:

(x,y) – coordenadas fotogramétricas;

$k_i$  (i = 1,3) – coeficientes da distorção radial;

(x',y') – coordenadas corrigidas.

**Distorção descentrada** – é decorrente da impossibilidade do fabricante alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõe o sistema de lentes. Este

não alinhamento provoca deslocamento na imagem. Estes deslocamentos possuem componentes radiais (assimétricas) e tangenciais. A formulação para corrigir a distorção descentrada é:

$$x'' = x' - \Delta_{dx} \quad (22)$$

$$y'' = y' - \Delta_{dy}$$

$$\Delta_{dx} = \left[ P_1 (x'^2 + y'^2) + 2P_2 x' y' \right] \quad (23)$$

$$\Delta_{dy} = \left[ P_1 x' y' + P_2 (x'^2 + y'^2) \right] \quad (24)$$

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$$

onde:

$P_1, P_2$  – coeficientes da distorção descentrada, obtidos no certificado de calibração;

$(x', y')$  – coordenadas fotogramétricas corrigidas da distorção radial;

$(x'', y'')$  – coordenadas fotogramétricas corrigidas da distorção descentrada.

#### 2.3.1.5.2 Refração fotogramétrica

A refração fotogramétrica é um erro sistemático que provoca um deslocamento radial da imagem a partir do ponto principal. Isto ocorre porque quando um raio de luz percorre a distância entre um objeto situado na superfície terrestre e o centro óptico da câmara, atravessa uma série de camadas atmosféricas. Cada camada possui temperatura, umidade relativa do ar e pressão diferentes da camada inferior, isto devido ao balanço da radiação solar e da quantidade de material sólido em suspensão. Então, o raio de luz ao atravessar meios com densidades diferentes, sofre uma variação na sua velocidade de propagação e por consequência um desvio de sua direção em relação à normal (ANDRADE, 1998).

As coordenadas serão corrigidas deste erro, utilizando a seguinte formulação:

$$x''' = x'' - \delta_x \quad (25)$$

$$y''' = y'' - \delta_y$$

$$\delta_x = x'' \varepsilon_{45} \left( \frac{r''^2}{f^2} + 1 \right) \quad (26)$$

$$\delta_y = y'' \varepsilon_{45} \left( \frac{r''^2}{f^2} + 1 \right) \quad (27)$$

$$r'' = \sqrt{x''^2 + y''^2}$$

onde:

F – distância focal;

$\varepsilon_{45}$  – parâmetro de refração fotogramétrica média para um ângulo de incidência de 45°;

(x'', y'') – coordenadas fotogramétricas corrigidas da distorção descentrada;

(x''', y''') – coordenadas fotogramétricas corrigidas da refração fotogramétrica.

Devido a incertezas e dificuldades na determinação correta do parâmetro  $\varepsilon_{45}$ , a refração fotogramétrica é um erro pouco considerado na maioria dos trabalhos fotogramétricos realizados no país (MITISHITA, 1997).

### 2.3.2 Orientação espacial aproximada da aerofoto

A orientação espacial aproximada da aerofoto consiste em usar transformação matemática aproximada para ser transformar coordenadas fotogramétricas em coordenadas planas no referencial geodésico local e realizar a verificação de possíveis erros grosseiros nos pontos de apoio. Não se tem uma transformação matemática linear, aplicada de forma direta, que possa modelar os efeitos causados pelo deslocamento da imagem em função do relevo na projeção central. A transformação linear projetiva no plano pode aproximar a superfície e apresentar resultados satisfatórios para as necessidades da aplicação, principalmente quando se tratar de região não muita acidentada (MITISHITA, 1997).



Para a determinação destes parâmetros são necessários observar pontos fotogramétricos de coordenadas no referencial geodésico local. Para tanto, têm-se três etapas básicas:

- Obtenção de coordenadas geodésicas locais dos pontos fotogramétricos marcados na aerofoto;
- Observações de pontos fotogramétricos;
- Determinação dos parâmetros da transformação.

### 2.3.3 Orientação exterior

Procedimento empregado na determinação dos parâmetros de orientação exterior da aerofoto ( $\kappa$ ,  $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ). Com as coordenadas dos pontos fotogramétricos no referencial fotogramétrico, referencial geodésico local e valores aproximados dos parâmetros, têm-se os requisitos necessários para a orientação exterior de uma aerofoto no espaço.

Na orientação exterior de uma aerofoto utilizam-se as equações de colinearidade na forma direta, conforme a equação 28:

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (28)$$

Onde:

( $x, y$ ) – coordenadas do ponto no referencial fotogramétrico;

( $X, Y, Z$ ) – coordenadas do ponto no referencial geodésico local

$c$  – distância focal da câmara;

( $X_0, Y_0, Z_0$ ) – parâmetros de posição do centro perspectivo da aerofoto;

$m_i$  – matriz dos parâmetros de rotação da fotografia nos três eixos ortogonais [ $R(\kappa), R(\phi), R(\omega)$ ].

Analisando a equação 20, verifica-se que no primeiro membro têm-se

as fotocoordenadas de pontos observados numa aerofoto, e no segundo as coordenadas dos mesmos pontos no referencial geodésico local. Tratando-se as coordenadas fotogramétricas e geodésicas como valores observados e determinados dentro de uma certa precisão, pode-se empregar o modelo de ajustamento paramétrico com injunções posicionais de peso para a determinação dos parâmetros de orientação exterior (MITISHITA, 1997).

#### 2.3.4 Obtenção das informações altimétricas da região a ser monorestituída

As informações necessárias para a modelagem matemática de superfícies podem ser obtidas de várias fontes de dados. Como mencionado anteriormente o modelo matemático empregado neste trabalho será o Modelo Digital de Superfície obtido por varredura a laser.

#### 2.3.5 Digitalização vetorial das entidades gráficas de interesse

Nesta fase, são digitalizadas as entidades cartográficas de interesse a partir da aerofoto digital posta no vídeo do computador. O sistema de computação gráfica (C.A.D.), disponibiliza as ferramentas gráficas necessárias à produção do arquivo digital na forma vetorial, como também o gerenciamento, manipulação e edição das entidades MITISHITA (1997). Ao término da digitalização, obtém-se um arquivo gráfico vetorial, onde todas as entidades estarão materializadas no referencial de desenho (CAD).

#### 2.3.6 Transformações entre referenciais e do sistema de projeção.

Nesta fase, tem-se por objetivo a retificação do arquivo gráfico vetorial. O que se propõe, é a transformação do arquivo vetorial original em um novo arquivo vetorial com projeção ortogonal. Os pontos definidos pelas entidades gráficas são primeiramente transformados para o referencial geodésico local e

depois para o sistema de projeção adotado. Então o processo de retificação fica definido por duas etapas. Primeiramente a transformação do ponto digitalizado na aerofoto no referencial de desenho (CAD) para o referencial geodésico local e depois a transformação para o sistema de projeção adotado.

Na transformação de um ponto qualquer de aerofoto digital no referencial de desenho para o referencial geodésico local, o modelo matemático adotado é o das equações de colinearidade inversas.(Equação 29):

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{11}x + m_{21}y + m_{31}c}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{21}x + m_{22}y + m_{32}c}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}c} \end{aligned} \quad (29)$$

O modelo expressa as coordenadas geodésicas locais planas estão em função das coordenadas dos pontos no referencial fotogramétrico e dos parâmetros de orientação exterior da aerofoto no espaço (LUGNANI, 1987).

Outro procedimento básico na transformação é o modelamento matemático da superfície dentro de um fluxo iterativo de transformações, que determina as coordenadas planas devidamente correlacionada com a coordenada altimétrica que foi determinada em função das planimétricas.

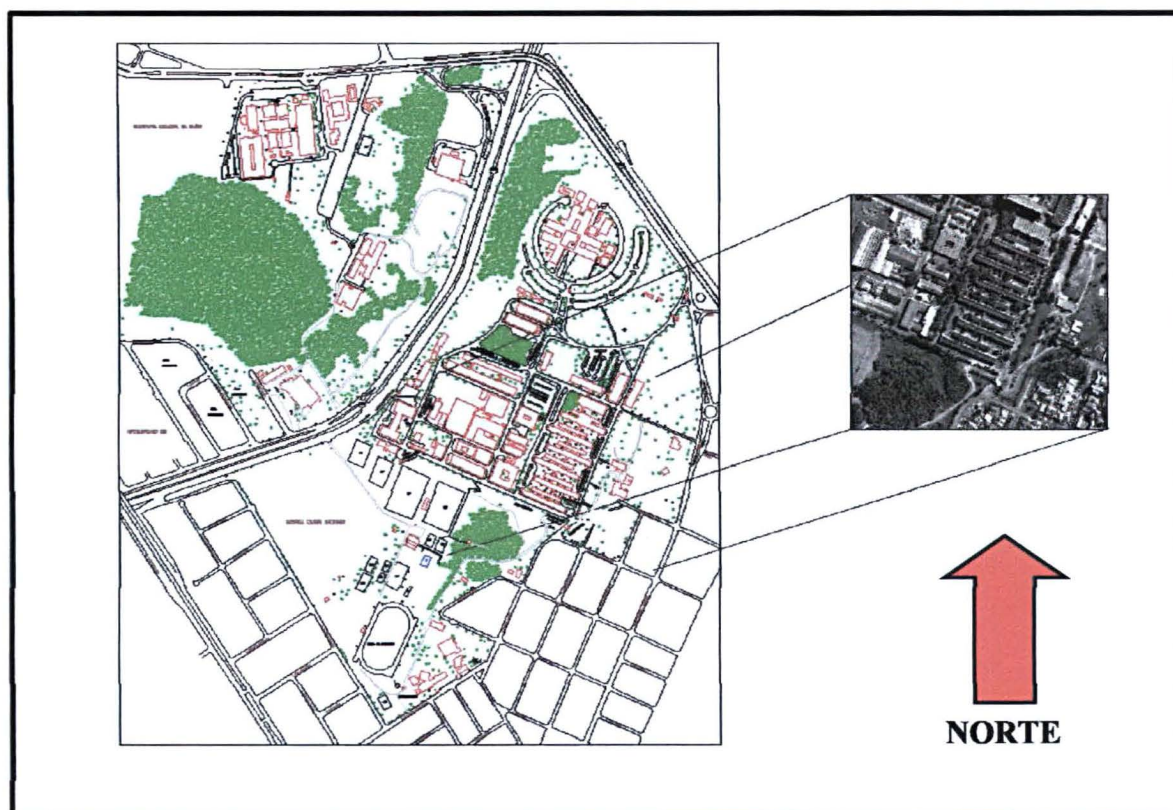
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir será apresentada a área de estudo, os materiais a serem utilizados e a metodologia proposta para este trabalho.

#### 3.1 ÁREA TESTE

A área teste é uma região do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná em Curitiba, estado do Paraná, mostrada na figura 12. Esta área inclui também uma região residencial vizinha à Universidade.

FIGURA 12 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA TESTE



Três tipos de ocupação do solo podem ser claramente identificados nesta região:

- a) as áreas residenciais de baixa densidade, compostas por residências de até dois pavimentos;

- b) a região do Centro Politécnico, composta por edificações de grande porte, jardins, vegetação arbórea e estacionamento.
- c) Quanto à rede viária, podem ser distinguidas ruas pavimentadas e ruas não pavimentadas.

### 3.2 MATERIAL UTILIZADO

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- Dados de varredura a laser oriundo do sistema OPTECH / INS GPS APPLANIX, pertencente ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR), com as seguintes informações:
  - a. Pontos no formato ASCII do último retorno de cada pulso, com coordenadas XYZ e o valor da intensidade;
  - b. Modelo Digital de Superfície, no formato ASCII, gerado pelo Sistema de Varredura a Laser;
  - c. Imagem Intensidade gerada pelo Sistema de Varredura a Laser.
- Duas aerofotos na escala de vôo 1/6.000 (câmara WILD-RC10 com distância focal de 153,73mm) digitalizadas matricialmente com um *scanner* fotogramétrico com 1000 d.p.i (1 pixel tem 25,4 µm), cedidos pela empresa AEROSAT Arquitetura e Engenharia;
- *software* Sistema Monorestituidor Digital;
- *software* para realizar o modelamento matemático da superfície *Surfer 7.0*;
- *software* estatístico Statgraphics;
- *software* gerenciador de imagens Envi 3.6;
- *softwares* CAD *MicroStation* e *AutoCad Map 2000i*;
- Microcomputador *Pentium III*;
- Carta do Centro Politécnico em meio digital na escala 1:2000 cedido pelo

Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná;

- Receptores GPS *TRIMBLE* fornecidos pelo Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná:
  - ASHTECH Z-XII, série 993;
  - ASHTECH Z-XII, série 996.

### 3.3 METODOLOGIA

Apresenta-se, a seguir, a metodologia aplicada para a realização da monorrestituição de uma acrofoto, utilizando os modelos digitais de superfície derivados do sistema de varredura a laser. Verificou-se a contribuição que o modelo digital de superfície pode trazer na monorrestituição de feições ao nível do solo, como as vias, e de elevações como as construções. Foi verificada também a qualidade geométrica dos produtos cartográficos derivados de imagens geradas com dados do Sistema de Varredura a Laser.

Para a avaliação destes procedimentos, foram coletados pontos das áreas monorrestituídas e comparadas com os mesmos pontos da estereorestituição. A avaliação se deu através de métodos estatísticos.

#### 3.3.1 Levantamentos de pontos com GPS

Para a avaliação da qualidade dos dados derivados da varredura a laser quanto a planimetria, foram levantados em campo pontos de controle usando GPS. Na primeira etapa foram selecionados detalhes na imagem intensidade derivada da varredura a laser, que fossem possíveis de se obter as coordenadas dos mesmos detalhes (pontos) na base cartográfica, fornecida pelo Departamento de Geomática da UFPR e também fossem de fácil acesso no campo para serem realizadas a obtenção das coordenadas geodésicas planas com o GPS.

Foram lidas na imagem de intensidade as coordenadas geodésicas planas dos pontos. Esta etapa foi realizada com o software ENVI 3.6, onde a

imagem intensidade no formato GEOTIFF foi aberta e lidas as coordenadas dos detalhes seleccionados. A próxima etapa foi o levantamento das coordenadas geodésicas planas em campo com GPS dos mesmos pontos seleccionados e lidos na imagem de intensidade.

Para a realização deste trabalho, optou-se em utilizar o método de levantamento estático rápido com taxa de coleta dos pontos de 5 segundos com o receptor GPS *TRIMBLE*. Devido ao fato da distância entre a base e os pontos levantados não ser muito grande, obteve-se uma precisão melhor que 2 mm. Este valor é superior à precisão dos dados fornecidos pelo LACTEC, em torno de 40 cm.

### 3.3.2 Geração de Imagens com os dados do Sistema de Varredura a Laser

Para uma avaliação da potencialidade das imagens derivadas do Sistema de Varredura a Laser numa composição colorida, foram primeiramente geradas grades regulares. A primeira grade corresponde aos dados do primeiro pulso, a segunda do último retorno do pulso laser. Gerou-se ainda mais duas grades com o valor da intensidade, provenientes do primeiro e ultimo pulso de cada ponto medido pelo sistema. Com estas quatro grades realizou-se um estudo e das feições presentes na superfície e após uma composição colorida com as imagens que melhor identificaram os objetos de estudo. Cada imagem foi associada a uma cor (Vermelho, Azul Verde)r. Fez-se posteriormente uma digitalização na tela sobre as entidades presentes na imagem derivada das grades geradas com 8 bits.

A tabela 02 mostra a resolução das grades geradas e também os valores inteiros dos cantos em metros.

TABELA 02 – RESOLUÇÃO DA GRADE

	Mínimo (m)	Máximo (m)	Resolução (m)	Linhas/Colunas
E	6775659,860	677996,227	0,40	1066
N	7183576,540	7183994,207	0,40	1041

### 3.3.2.1 Geração de Imagens em Tons de Cinza

A seguir serão descritos os procedimentos para a geração das imagens do primeiro e do último retorno do pulso laser:

- a) selecionou-se uma área dentro do levantamento do Sistema de Varredura a Laser, segundo a tabela 02.
- b) a seguir, foram selecionados os pontos correspondentes à área de estudo. No arquivo de saída recortado foram apenas utilizadas as informações X,Y e Z de cada ponto dentro da área em questão. Para a realização deste recorte dos dados na área definida e escolha das informações necessárias para a produção da imagem utilizou-se o *software Surfer*. Foram gerados dois arquivos, um com os dados do primeiro retorno do pulso e outro com os dados do último retorno do pulso laser.
- c) com os dados já recortados do primeiro e do último retorno do pulso laser, foram geradas duas grades com o Interpolador de *Kriging* (aqui foi utilizado o interpolador de *Kriging* linear). O espaçamento da grade ficou definido em 40 centímetros, já que o levantamento destes dados garantiu a distância mínima entre pontos.
- d) através das grades geradas no item (c), foi possível gerar uma imagem digital da região em tons de cinza (aqui a altitude do ponto é transformada em tons de cinza). Para a realização deste processo utilizou-se uma ferramenta do *software Envi 3.6* que transforma pontos de uma grade no formato texto (GSASCII) em um arquivo imagem (GEOTIFF). As imagens de saída ficaram com o tamanho de 1066 linhas por 1041 colunas, com uma resolução radiométrica de 8 bit's (256 níveis de cinza) e resolução geométrica de 40 centímetros. A figura 13(a) e 13(b) mostram as imagens em tons de cinza do primeiro retorno do pulso e do último retorno do pulso.



FIGURA 13 – IMAGEM EM TONS DE CINZA DO PRIMEIRO RETORNO DO PULSO (A)  
E IMAGEM EM TONS DE CINZA DO ÚLTIMO RETORNO DO PULSO (B)



(a)

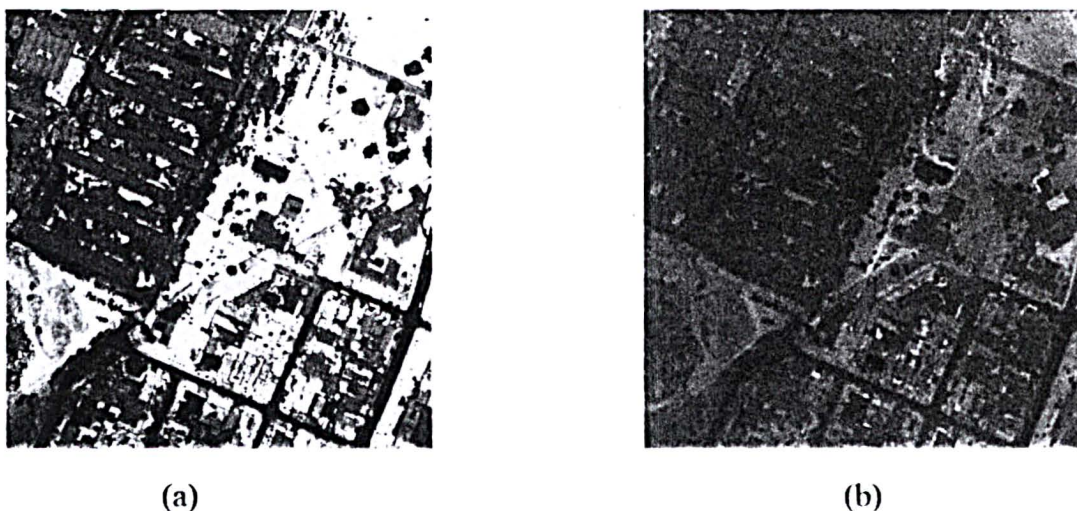


(b)

#### 3.3.2.2 Geração das Imagens Intensidades

Uma terceira e uma quarta grade, correspondente à intensidade foram interpoladas a partir dos dados pontuais de intensidade do levantamento laser provenientes do primeiro e do último retorno do pulso. O passo seguinte foi à transformação da grade regular com valor da intensidade no formato texto (GS ASCII), numa imagem intensidade no formato TIFF. Para isto utilizou-se o *software Envi 3.6*. A figura 14(a) mostra a imagem intensidade proveniente do primeiro retorno do pulso e a figura 14(b) mostra a imagem proveniente do último retorno do pulso.

FIGURA 14 -- IMAGEM INTENSIDADE DO PRIMEIRO RETORNO DO PULSO (A) E  
IMAGEM INTENSIDADE DO ÚLTIMO RETORNO DO PULSO (B)



### 3.3.3 Modelo Digital de Superfície

O MDS gerado nessa etapa foi utilizado no sistema de monorrestituição. Neste processo, os pontos derivados do Sistema de Varredura a Laser com suas coordenadas (X,Y,Z) que materializam o terreno e as elevações presentes, foram utilizados na geração dos modelos digitais. Utilizou-se o arquivo ASCII bruto, ou seja, com todos os pontos coletados pelo sistema. Este arquivo contém as informações da superfície e das elevações presente na região, ou seja.

Com estas informações e o programa *Surfer*, gerou-se uma grade regular, com espaçamento de 40 cm nas direções x e y. O Interpolador de *Kriging* foi o escolhido para a geração das superfícies contínuas. Na representação destas superfícies foram geradas as informações gerais contidas no terreno e também as elevações presentes sobre este terreno. Ao representar esta superfície, o interpolador gerou uma grade contínua entre as divisas das edificações com a superfície, ou seja, onde existia uma descontinuidade antes da geração da grade por causa da altura das edificações, foi interpolado um plano inclinado, onde os pontos do topo das elevações e da superfície ao lado são

ligados por pontos intermediários.

#### **3.3.4 Monorrestituição digital**

A digitalização com o Sistema Monorestituidor Digital (SMD) está vinculada à execução da orientação interior da aerofoto, espacial aproximada e exata, vetorização das entidades de interesse presentes na aerofoto e transformação entre referências e do sistema de projeção.

A obtenção do arquivo gráfico referenciado a um sistema de projeção por meio da monorrestituição segue as seguintes etapas:

- a) digitalização das entidades de interesse: com a aerofoto no vídeo do computador, vetorizou-se as entidades de interesse. Neste trabalho foram vetorizadas as edificações de grande área e as rodovias. Foram escolhidas estas duas entidades por possuírem formas mais regulares e por serem as entidades que foram vetorizadas na imagem obtida por varredura a laser. Assim pode-se realizar uma melhor avaliação dos resultados obtidos por estes dois procedimentos. Para a avaliação desta vetorização sobre a aerofoto foi utilizada a base cartográfica cedida pelo Departamento de Geomática.
- b) Transformação entre referências do espaço imagem e objeto: esta etapa diz respeito à retificação do arquivo gráfico obtido no item (a) deste capítulo. O objetivo aqui foi fazer com que os pontos que definem as entidades vetorizadas fossem transformados do referencial de máquina (CAD) para um sistema de projeção cartográfica. Este procedimento obedeceu a seguinte sequência através de um processo iterativo:
  - obter as coordenadas dos pontos digitalizados no referencial de máquina (desenho);
  - Transformação das coordenadas do referencial de máquina para o referencial fiducial e deste para o referencial fotogramétrico corrigidas dos erros sistemáticos;

- Transformação das coordenadas do referencial fotogramétrico corrigido para o referencial geodésico local plano aproximado, utilizando a transformação projetiva plana;
- Determinar a coordenada Z (altimétrica) do ponto com as coordenadas aproximadas no MDT;
- Determinação das coordenadas geodésicas planas dos pontos digitalizados com as coordenadas fotogramétricas destes pontos, a coordenada Z e as equações de colinearidade inversa;
- Determinar numa nova coordenada altimétrica mais precisa no DTM, e com esta determinar uma coordenada geodésica local plana com a equação da colinearidade inversa. Isto é feito uma vez que as coordenadas determinadas no item anterior são imprecisas devido ao fato de que a coordenada altimétrica do ponto foi obtida por interpolação. Esta nova coordenada altimétrica é mais precisa do que as determinadas anteriormente;
- Realizar uma nova iteração sempre que a diferença planimétrica entre as coordenadas geodésicas locais planas calculadas entre duas iterações for maior que a precisão definida;
- Finalizar o processo quando a diferença entre duas iterações consecutivas estiver dentro da precisão definida.

#### 3.3.4.1 Interpolação altimétrica

A técnica de monorrestituição digital de aerofotos necessita de um modelo matemático de superfícies para a determinação da coordenada altimétrica (Z) do ponto a ser retificado. O sistema utiliza algoritmos matemáticos capazes de interpolar a coordenada altimétrica dentro das precisões necessárias à retificação das coordenadas planimétricas do ponto (MITISHITA, 1997). Neste trabalho foram testados dois algoritmos matemáticos de interpolação, o interpolador vizinho mais próximo e o interpolador superfície triangular plana,

para verificar os seus resultados com os dados derivado do varredor laser.

#### 3.3.4.1.1 Vizinho mais próximo

Este interpolador é o mais simples. Para cada ponto bidimensional é atribuído o valor de altimetria (Z) do ponto mais próximo na grade regular. Este tipo de interpolador deve ser usado quando há a necessidade de manter os valores altimétricos dos pontos na grade sem gerar valores intermediários.

#### 3.3.4.1.2 Superfície triangular plana

É um processo de interpolação baseada numa estrutura triangular (poliedros de faces triangulares planas). Aproximando-se o interior de cada face triangular com um plano médio passante pelos três pontos do triângulo, e o ponto a ser interpolado, contido neste triângulo. A função de interpolação da coordenada altimétrica (Z) pode ser dada pela equação 30:

$$Z(x, y) = ax + by + d \quad (30)$$

Os coeficientes da equação 30 são determinados com as informações contidas no triângulo. Este tipo de interpolação altimétrica apresenta algumas vantagens e desvantagens. Como vantagem ele possui um pequeno tempo de processamento e é fácil de programar, entretanto apresenta a desvantagem de não tratar matematicamente a continuidade entre os triângulos. Porém quando aplicado numa triangulação com pequeno espaçamento entre os pontos, como os dados do varredor laser, este procedimento apresenta bons resultados.

### 3.3.5 Análise estatística dos resultados

Para uma avaliação mais consistente dos dados obtidos através da imagem de varredura a laser e da monorrestituição, utilizou-se o Decreto Lei 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece parâmetros para a classificação de

cartas topográficas. A tabela 03 mostra que a avaliação pode ser realizada pelo Padrão de Precisão Cartográfica (PEC) e pelo erro padrão. Neste trabalho o método de avaliação foi feito pelo PEC. O decreto considera que: “para efeito das presentes instruções, consideram-se equivalentes às expressões erro Padrão, Desvio padrão e Erro Médio Quadrático”.

TABELA 03 – ESPECIFICAÇÕES PARA CLASSIFICAR CARTAS

Escala	Classe	PEC				Erro Padrão			
		Planimétrico		Altimétrico		Planimétrico		Altimétrico	
		Carta (mm)	Terreno (m)	Carta (eqd)	Terreno (m)	Carta (mm)	Terreno (m)	Carta (eqd)	Terreno (m)
<b>1:1000</b>	A	0.5	0.5	1*(1/2)	0.5	0.3	0.3	1*(1/3)	0.3
	B	0.8	0.8	1*(3/5)	0.6	0.5	0.5	1*(2/5)	0.4
	C	1.0	1.0	1*(3/4)	0.8	0.6	0.6	1*(1/2)	0.5
<b>1:2000</b>	A	0.5	1.0	1*(1/2)	0.5	0.3	0.6	1*(1/3)	0.3
	B	0.8	1.6	1*(3/5)	0.6	0.5	1.0	1*(2/5)	0.4
	C	1.0	2.0	1*(3/4)	0.8	0.6	1.2	1*(1/2)	0.5
<b>1:5000</b>	A	0.5	2.5	1*(1/2)	1.0	0.3	1.5	1*(1/3)	0.7
	B	0.8	4.0	1*(3/5)	1.2	0.5	2.5	1*(2/5)	0.8
	C	1.0	5.0	1*(3/4)	1.5	0.6	3.0	1*(1/2)	1.0
<b>1:10000</b>	A	0.5	5.0	1*(1/2)	2.5	0.3	3.0	1*(1/3)	1.7
	B	0.8	8.0	1*(3/5)	3.0	0.5	5.0	1*(2/5)	2.0
	C	1.0	10.0	1*(3/4)	3.8	0.6	6.0	1*(1/2)	2.5
<b>1:25000</b>	A	0.5	12.5	1*(1/2)	5.0	0.3	7.5	1*(1/3)	3.3
	B	0.8	20.0	1*(3/5)	6.0	0.5	12.5	1*(2/5)	4.0
	C	1.0	25.0	1*(3/4)	7.5	0.6	15.0	1*(1/2)	5.0
<b>1:50000</b>	A	0.5	25.0	1*(1/2)	10.0	0.3	15.0	1*(1/3)	6.6
	B	0.8	40.0	1*(3/5)	12.0	0.5	25.0	1*(2/5)	8.0
	C	1.0	50.0	1*(3/4)	15.0	0.6	30.0	1*(1/2)	10.0
<b>1:100000</b>	A	0.5	50.0	1*(1/2)	25.0	0.3	30.0	1*(1/3)	16.7
	B	0.8	80.0	1*(3/5)	30.0	0.5	50.0	1*(2/5)	20.0
	C	1.0	100.0	1*(3/4)	37.5	0.6	60.0	1*(1/2)	25.0
<b>1:200000</b>	A	0.5	125.0	1*(1/2)	50.0	0.3	75.0	1*(1/3)	33.3
	B	0.8	200.0	1*(3/5)	60.0	0.5	125.0	1*(2/5)	40.0
	C	1.0	250.0	1*(3/4)	75.0	0.6	150.0	1*(1/2)	50.0

FONTE: (BRASIL, 1984)

Como base para avaliação das cartas, utilizaram-se as diferenças entre as coordenadas de pontos que formam uma entidade, presentes na base estereorestituída com as obtidas na imagem de varredura a laser e na monorrestituição.

O procedimento adotado para a coleta dos pontos foi à vetorização das entidades presentes na imagem e nas aerofotos. As entidades foram divididas em edificações e vias presentes na base estereorestituída. A coleta das coordenadas

presentes na imagem e na aerofoto foram realizadas de maneiras semelhantes. Para as imagens utilizou-se o software Autocad onde foi possível sobrepor a base à imagem. Com isto analisaram-se e escolheram-se as entidades visíveis na imagem e presentes na base. A coleta dos pontos foi realizada de forma independente, ou seja, depois de selecionadas as entidades, os pontos da imagem e da base foram coletados separadamente.

Com as diferenças das coordenadas E e N das feições da base e das cartas obtidas da imagem e da monorrestituição, calculou-se a média e o desvio padrão derivados da diferença. A análise estatística baseou-se primeiramente em verificar a normalidade dos dados (diferença entre as coordenadas E e N) e depois verificar se a hipótese de que a média da amostra coincide com a origem, ou seja, que não ocorre tendências.

No primeiro caso, a da verificação da normalidade, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (*K-S Teste*). A resposta deste teste é um valor de probabilidade, sendo que o resultado tem que ser maior que 0,05, para se confirmar o valor de normalidade dos dados. Para o cálculo deste teste utilizou-se o Software estatístico *Statgraphics*, a série de dados analisados corresponde à diferença das coordenadas de cada entidade. Para cada diferença foi calculada a distância quadrática generalizada como mostra a equação 31. (JOHNSON; WICHERN, 1998):

$$d_j^2 = (x_j - x)^T S^{-1} (x_j - x) \quad (31)$$

onde:

$j = 1, \dots, n$ ;

$x_j$  = vetor que contém as diferenças entre as coordenadas ( $\Delta E$  e  $\Delta N$ );

$x$  = vetor que contém as médias de  $\Delta E$  e  $\Delta N$ ;

$S$  = matriz variância covariância entre  $\Delta E$  e  $\Delta N$ .

Depois de verificada e validada a normalidade dos dados o próximo teste é o da verificação da hipótese de que as diferenças se concentram em torno da origem. Para isto, é utilizado o teste estatístico  $T^2$  de Hoelling. Este teste



verifica que a média da amostra coincide com a origem, ou seja, é nula. Para isto, o nível de significância de  $\alpha = 95\%$ , foi adotado. Caso a hipótese não for satisfeita, ou seja, se a hipótese nula for rejeitada, a média das amostras não estão próxima de (0,0), o que quer dizer que ocorre uma tendência desta amostra se concentrar fora da origem (JOHNSON; WICHERN, 1998). Este teste é dado pela equação 32:

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad & H_0 : \mu = \mu_0 \\ & H_1 : \mu \neq \mu_0 \\ \text{b)} \quad & n (X - \mu_0)^T S^{-1} (X - \mu_0) > [(n-1)p/n-p] F_{(p, n-p)} \end{aligned} \quad (32)$$

onde:

$n$  = número da amostra;

$X$  = vetor das médias de DE e DN;

$\mu_0 = [0 \ 0]^T$ ;

$S$  = matriz variância covariância entre DE e DN;

$p$  = número de variáveis (no presente trabalho  $p = 2$ , pois só existem duas médias, DE e DN);

$F_{(p, n-p)}$  = valor obtido na tabela F de *Snedecor* com  $(p, n-p)$  graus de liberdade.

Para que as médias sejam iguais a zero, o lado esquerdo da equação 32 tem que ser numericamente maior que o lado direito da mesma equação. Sendo assim a condição de hipótese nula ( $H_0$ ), com um nível de 95% de significância pode ser aceita.



## 4 RESULTADOS

### 4.1 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE GEOMÉTRICA DO SISTEMA DE VARREDURA A LASER.

Nesta etapa foi verificada a qualidade planimétrica que o Sistema de Varredura a Laser obteve através dos pontos GPS levantados. Foram seleccionados pontos GPS que fossem visíveis na imagem intensidade derivada da varredura laser. Os pontos seleccionados eram esquinas de meios fios, canto de canteiros e canto de estacionamentos. Realizaram-se 24 observações em campo sendo que apenas uma destas não pode ser utilizada no cálculo dos resíduos. A tabela 04 mostra os resíduos obtidos com a diferença entre as coordenadas e o erro médio quadrático para as observações.

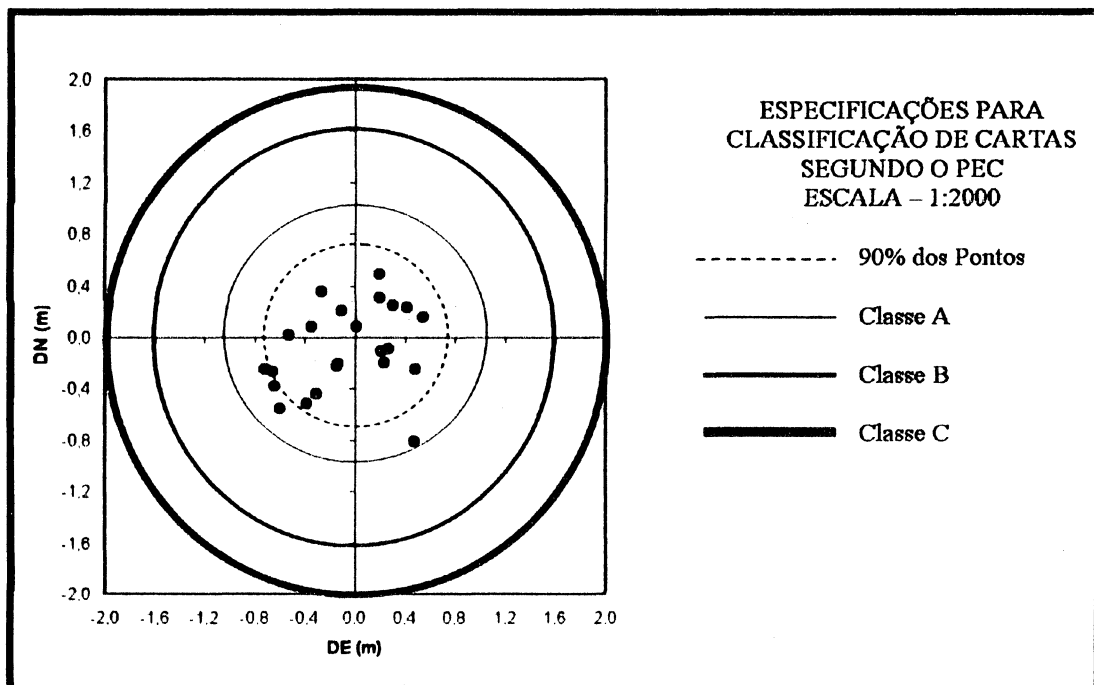
TABELA 04 – DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS GPS E COORDENADAS DO VARREDOR LASER

Pt.	GPS		LASER		Diferenças (m)		Res. (m)
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	DE(m)	DN(m)	
01	677905,551	7184379,641	677906,216	7184379,905	-0,665	-0,264	0,716
02	677646,289	7184291,590	677646,672	7184292,101	-0,383	-0,511	0,638
03	677972,815	7183912,740	677972,962	7183912,962	-0,147	-0,222	0,267
04	677382,270	7183861,754	677381,797	7183862,567	0,473	-0,813	0,940
05	677469,225	7184128,707	677469,870	7184129,090	-0,645	-0,382	0,750
06	677826,725	7184102,000	677827,446	7184102,249	-0,721	-0,248	0,763
07	677349,598	7183649,184	677349,906	7183649,626	-0,308	-0,442	0,539
08	677231,237	7183387,047	677231,836	7183387,599	-0,599	-0,552	0,814
09	677102,892	7184557,321	677103,428	7184557,305	-0,536	0,016	0,536
10	677161,781	7184619,623	677161,774	7184619,538	0,007	0,085	0,085
11	677759,127	7183691,656	677758,926	7183691,348	0,201	0,308	0,368
12	677394,532	7183981,149	677394,338	7183980,664	0,194	0,484	0,521
13	677021,198	7184626,609	677020,991	7184626,712	0,208	-0,104	0,232
14	677156,349	7184626,121	677156,488	7184626,329	-0,139	-0,208	0,250
15	677124,109	7184100,140	677124,459	7184100,060	-0,350	0,081	0,360
16	677268,310	7184089,327	677268,041	7184089,416	0,269	-0,089	0,283
17	677380,162	7184208,732	677379,753	7184208,505	0,409	0,227	0,468
18	677699,171	7184182,731	677698,869	7184182,479	0,302	0,252	0,393
19	678059,424	7184191,350	678059,194	7184191,546	0,230	-0,197	0,303
20	678274,548	7183694,898	678274,655	7183694,695	-0,108	0,203	0,230
21	678094,387	7183645,170	678093,909	7183645,418	0,478	-0,248	0,538
22	677691,523	7183670,330	677690,982	7183670,176	0,541	0,154	0,562
23	677376,190	7183626,255	677376,458	7183625,903	-0,268	0,352	0,442
				Média	-0,068	-0,092	0,478
				Desvio Padrão	0,408	0,328	0,219

Neste trabalho as diferenças entre as coordenadas E e N dos resultados obtidos foram denominadas como resíduos.

A média para os resíduos em “E” e “N” ficaram respectivamente com os valores de  $-0,068$  m e  $-0,092$  m. Verificando as diferenças entre as coordenadas, percebe-se que na maioria dos pontos ficou próxima a 40 centímetros, que é o tamanho do pixel na imagem intensidade. A figura 15 ilustra as diferenças entre as coordenadas N e E de cada ponto. No gráfico o eixo vertical, diz respeito á diferença das coordenadas N, e o eixo horizontal diz respeito á diferença entre as coordenadas E. Percebe-se que as diferenças entre as coordenadas ficaram em torno da origem (0,0) e o círculo tracejado mostra a região que engloba 90% dos resíduos calculados, ou 90% dos pontos testados apresentam uma discrepância planimétrica menor que 0,73 m. Ver tabela 03 na página 47.

FIGURA 15 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS GPS-VARREDOR LASER NA ESCALA 1:2000



Verifica-se na figura 15 que ocorreu uma tendenciosidade dos dados ficarem levemente ao longo do eixo E. isto ocorreu devido ao sistema inercial não conseguir parametrizar bem o ângulo sobre o eixo de vôo.

## 4.2 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA CARTA PLANIALTIMÉTRICA.

Esta etapa foi realizada a fim de verificar a qualidade da carta planialtimétrica existente utilizada como base para a avaliação da monorrestituição que será descrita posteriormente.

Para que houvesse uma coerência com os dados do Sistema de Varredura a Laser já avaliado, optou-se em utilizar os mesmos pontos GPS já levantados. Foram calculadas as diferenças dos pontos observados com GPS e os mesmos pontos retirados da base cartográfica. A tabela 05 mostra as coordenadas dos testes dos pontos bem como os seus resíduos e o erro médio quadrático obtido.

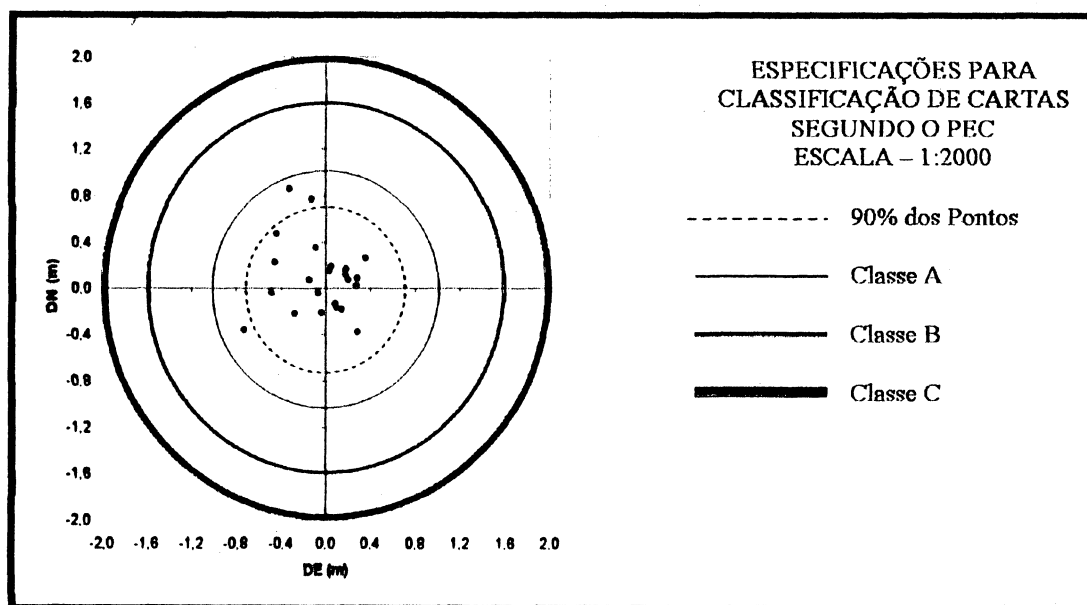
TABELA 05 - DIFERENÇA ENTRE COORDENADAS GPS E COORDENADAS DA BASE CARTOGRÁFICA

Pt	GPS		BASE CARTOGRÁFICA		Diferenças		Res (m)
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	DE(m)	DN(m)	
01	677905,551	7184379,641	677906,010	7184379,420	-0,459	0,221	0,509
02	677646,289	7184291,590	677646,018	7184291,567	0,271	0,023	0,272
03	677972,815	7183912,740	677972,853	7183912,952	-0,038	-0,212	0,215
04	677382,270	7183861,754	677382,716	7183861,287	-0,446	0,467	0,646
05	677469,225	7184128,707	677469,952	7184129,072	-0,727	-0,365	0,813
06	677826,725	7184102,000	677827,214	7184102,045	-0,489	-0,045	0,491
07	677349,598	7183649,184	677349,874	7183649,405	-0,276	-0,221	0,354
08	677231,237	7183387,047	677231,206	7183386,897	0,031	0,150	0,153
09	677102,892	7184557,321	677103,215	7184556,470	-0,323	0,851	0,910
10	677161,781	7184619,623	677161,904	7184618,855	-0,123	0,768	0,778
11	677759,127	7183691,656	677758,945	7183691,491	0,182	0,165	0,246
12	677394,532	7183981,149	677394,624	7183980,800	-0,092	0,349	0,360
13	677021,198	7184626,609	677021,120	7184626,741	0,078	-0,133	0,154
14	677156,349	7184626,121	677156,422	7184626,162	-0,073	-0,041	0,083
15	677124,109	7184100,140	677124,263	7184100,066	-0,154	0,074	0,171
16	677268,310	7184089,327	677268,264	7184089,144	0,046	0,183	0,188
17	677380,162	7184208,732	677379,962	7184208,662	0,200	0,070	0,212
18	677699,171	7184182,731	677699,001	7184182,615	0,170	0,116	0,206
19	678059,424	7184191,350	678059,288	7184191,535	0,136	-0,186	0,230
20	678274,548	7183694,898	678274,267	7183694,812	0,281	0,086	0,294
21	678094,387	7183645,170	678094,035	7183644,915	0,352	0,255	0,435
22	677691,523	7183670,330	677691,235	7183670,711	0,287	-0,381	0,477
23	677376,190	7183626,255	677376,095	7183626,425	0,095	-0,170	0,195
				Média	-0,047	0,088	0,365
				Desvio Padrão	0,291	0,313	0,232

Analisando visualmente a figura 16, nota-se que a distribuição das diferenças dos pontos concentram-se em torno de zero. O círculo tracejado

mostra que 90% dos pontos calculados apresentam uma discrepância menor que 0,66 m. de acordo com a tabela 3 da página 47, estes resultados indicam que as coordenadas testadas pertencem à Classe A.

FIGURA 16 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS PARA A AVALIAÇÃO DA BASE CARTOGRÁFICA



Percebe-se pela figura 16 que as discrepâncias dos pontos da base com o GPS ficaram um pouco afastadas da origem (0,0) devido ao erro humano que ocorreu na leitura dos pontos sobre a base. Estes erros podem ser desconsiderados já que 90% dos pontos ficaram com diferenças abaixo de um metro.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DA DIGITALIZAÇÃO EFETUADA NAS IMAGENS OBTIDAS POR VARREDURA A LASER

Como cada imagem obtida a partir de varredura a laser contém informações específicas da área de estudo, foi efetuada uma avaliação do uso individual e conjunto destas. Para o caso de uma análise individual verificou-se qual era a imagem que melhor definiria as entidades presentes na imagem. E no caso de uma análise conjunta, foi utilizada uma composição de três imagens ao


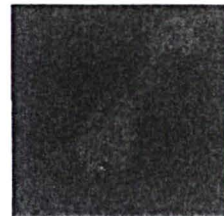

mesmo tempo. Neste caso, o objetivo foi verificar a melhora na identificação das bordas que estas imagens conjuntas poderiam trazer para as entidades presentes na superfície no caso de realizar uma vetorização sobre a mesma.

Para uma avaliação eficaz da imagem foram selecionadas as assinaturas espectrais presentes na região. Foram encontradas três assinaturas de objetos spectralmente separáveis (vegetação, construções, vias) que foram divididas em feições para uma melhor interpretação visual das imagens. As vegetações presentes na região podem ser visualizadas nas tabelas 06 (a e b).

**TABELA 06a – CHAVE DA INTERPRETAÇÃO DOS DADOS LASER - VEGETAÇÃO**

<b>Assinatura</b>	<b>Feição</b>	<b>Imagem Origem</b>	<b>Pulso</b>	<b>Amostras</b>
Vegetação	Gramma Seca	intensidade	Último	
	Capoeirinha	intensidade	Primeiro	

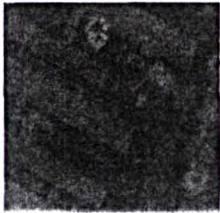
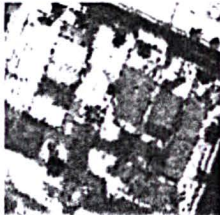
TABELA 06b – CHAVE DA INTERPRETAÇÃO DOS DADOS LASER – VEGETAÇÃO

Assinatura	Feição	Imagem Origem	Pulso	Amostras
Vegetação	Árvores de grande porte (isoladas)	altimetria	Primeiro	
	Árvores de médio porte (isoladas)	altimetria	Primeiro	
	Bosque	intensidade	Primeiro	

Verifica-se através das tabelas 06 (a e b) que os tipos de vegetação foram identificadas em diferentes imagens derivadas do varredor laser. Árvores isoladas, sendo de grande porte ou médio porte, são melhores visualizadas nas imagens de altimetria. Isto ocorre devido ao poder de penetração do pulso laser que permite identificar o topo das arvores, com o primeiro pulso e a superfície logo abaixo com o retorno do último pulso. Já tipos de vegetação mais densa como a grama seca, capocirinha e bosque ficam identificáveis na imagem de intensidade. Isto ocorreu, pois a intensidade do píxel representa melhor feições que estão com densidades maiores.

A tabela 07 mostra a característica das construções presentes na imagem derivada do varredor laser.

TABELA 07 – CHAVE DA INTERPRETAÇÃO DOS DADOS LASER - CONSTRUÇÕES



Assinatura	Feição	Imagem Origem	Pulso	Amostras
Construções	Edificação grande porte (área)	altimetria	Primeiro	
	Edificação pequeno porte (área)	intensidade	Primeiro	

Verifica-se, através das amostras presentes na tabela, que as edificações de grande porte são facilmente identificadas devido a seu tamanho e pela boa definição de suas bordas. Já as construções de pequeno porte, devido ao fato das bordas estarem justapostas, a sua identificação na imagem derivada do varredor laser ficou comprometida.

A tabela 08 mostra as vias presentes na região. Pode-se verificar através desta tabela que existem dois tipos de vias, as ruas pavimentadas e as ruas não pavimentadas.



TABELA 08 – CHAVE DA INTERPRETAÇÃO DOS DADOS LASER - VIAS

Assinatura	Feição	Imagem Origem	Pulso	Amostras
Vias	Ruas pavimentadas	intensidade	Primeiro	
	Ruas não pavimentadas	intensidade	Primeiro	

Verificou-se os dois tipos de vias mostrados na tabela 08 tiveram uma resposta espectral bem definida na imagem intensidade derivada do varredor laser. Este fato ocorreu devido, em ambas as vias, a intensidade do píxel nestas feições contrasta com sua vizinhança, facilitando assim a identificação das feições.

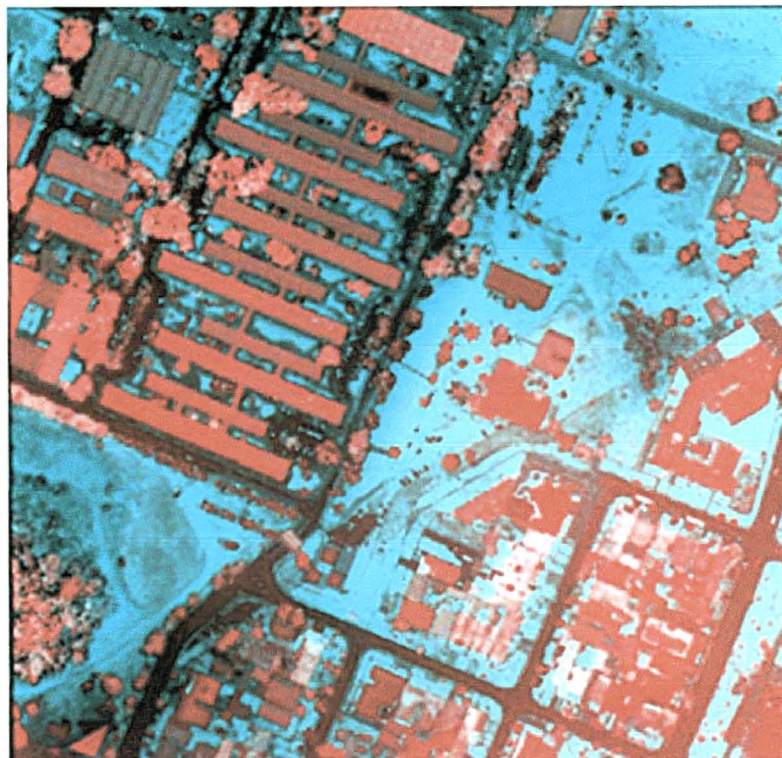
A análise visual se baseou-se, principalmente, no contraste entre o objeto e sua vizinhança. Este contraste pode variar ao longo da imagem em função da combinação de elementos. Alguns objetos foram facilmente identificados, como a malha viária de vias de asfalto. Por outro lado, as pequenas construções que ocupam as quadras das regiões vizinhas ao Centro Politécnico da UFPR não são de fácil identificação.

Devido aos resultados obtidos mostrado nas tabela 06 a 08, verificou-se que as imagens em tons de cinza provindas do primeiro pulso e do último pulso, bem como a imagem intensidade do primeiro pulso, são as melhores para a realização da composição das imagens. A seguir foi feita a composição das imagens e verificou-se que as edificações e vias foram bem ressaltadas dos outros objetos, ficando assim mais fácil à vetorização. A figura



17 mostra a imagem composta pelas imagens providas da altimetria e intensidade dos dados do Sistema de Varredura a Laser.

FIGURA 17 – COMPOSIÇÃO COLORIDA DOS DADOS ALTIMÉTRICOS E INTENSIDADE DERIVADOS DO VARREDOR LASER.



(R = PRIMEIRO PULSO; G = ÚLTIMO PULSO; B = IMAGEM INTENSIDADE)

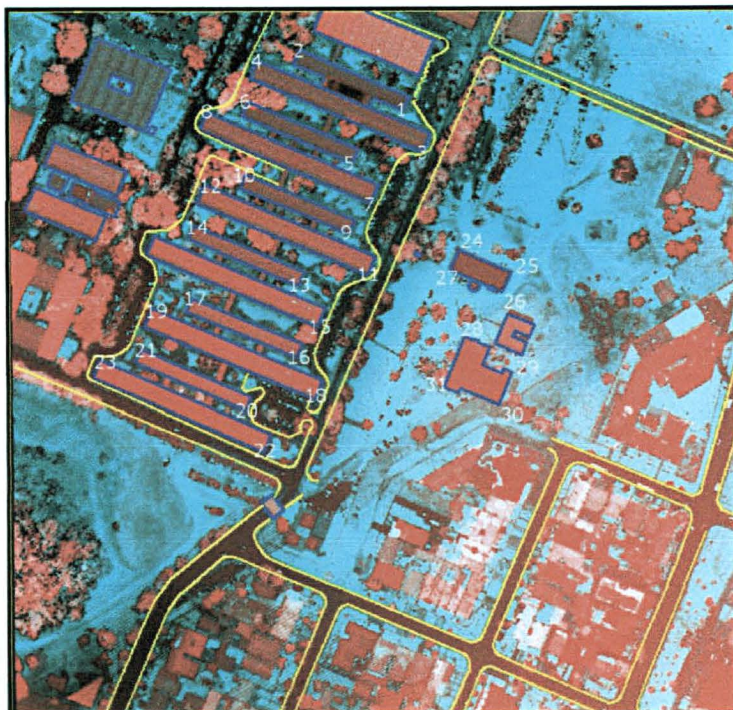
#### 4.3.1 Vetorização das Entidades

A vetorização das entidades foi realizada com o programa Autocad Map 2000. Com a imagem obtida por varredura a laser na tela do computador, juntamente com a base cartográfica, foram verificadas primeiramente quais feições que estavam presentes na base cartográfica apareciam nítidas na imagem. Depois desta verificação, vetorizou-se sobre a imagem na tela as feições mais regulares, por exemplo, vias e edificações, utilizando linhas contínuas (*Polyline*).

As feições digitalizadas foram: “vias pavimentadas” e edificações de grande áreas, devido ao fato de ambas estarem nítidas na imagem derivada do varredor laser e estarem presentes na base cartográfica. Isto pode ser observado

no exemplo da figura 18, que mostra as feições digitalizadas. Ela mostra os pontos utilizados na avaliação da vetorização das edificações sobre a imagem.

FIGURA 18 – EXEMPLO FEIÇÕES VETORIZADAS



#### 4.3.2 Avaliação da qualidade geométrica da digitalização sobre a imagem de varredura a laser

A tabela 09 mostra os resíduos entre os pontos obtidos com a vetorização realizada sobre a imagem derivada do varredor laser para edificações de grande porte. Como base para avaliação desta vetorização utilizou-se o mapa digital estereorestituído fornecido pelo Departamento de Geomática da UFPR.

**TABELA 09 - DIFERENÇA ENTRE OS PONTOS OBTIDOS NA IMAGEM DE  
VARREDURA A LASER COM A BASE CARTOGRÁFICA (CONSTRUÇÕES)**

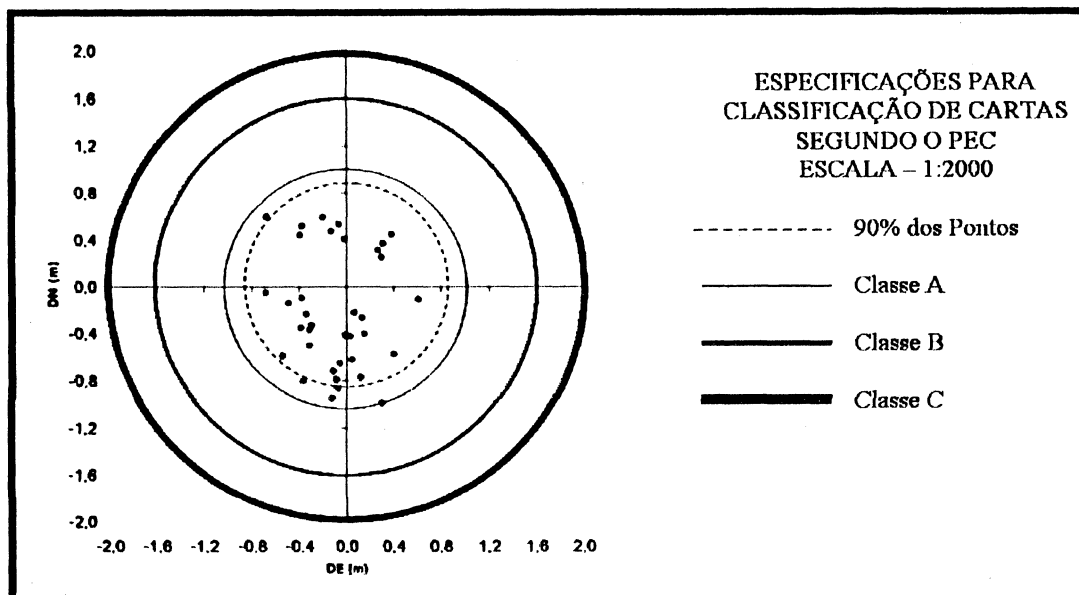
Pt	BASE		LASER (Edificações)		Diferença		Res
	E1 (m)	N1 (m)	E2 (m)	N2(m)	DE(m)	DN(m)	
1	677801,759	7183934,529	677801,456	7183935,519	0,303	-0,990	1,035
2	677817,420	7183920,886	677816,814	7183920,999	0,606	-0,113	0,617
3	677812,870	7183910,261	677812,469	7183910,840	0,401	-0,579	0,704
4	677775,107	7183911,736	677775,184	7183912,604	-0,077	-0,868	0,872
5	677771,515	7183903,439	677771,632	7183904,160	-0,117	-0,721	0,731
6	677786,868	7183890,300	677787,164	7183890,630	-0,296	-0,329	0,443
7	677782,234	7183879,551	677782,290	7183880,206	-0,056	-0,655	0,657
8	677773,415	7183869,297	677773,437	7183868,892	-0,022	0,405	0,406
9	677769,316	7183861,444	677769,999	7183861,500	-0,683	-0,056	0,685
10	677785,391	7183847,257	677785,009	7183846,809	0,382	0,448	0,589
11	677780,705	7183836,327	677780,588	7183837,103	0,117	-0,776	0,785
12	677743,444	7183838,265	677743,759	7183838,639	-0,315	-0,374	0,489
13	677739,861	7183829,944	677739,980	7183830,897	-0,119	-0,953	0,961
14	677755,503	7183816,470	677755,477	7183816,895	0,026	-0,425	0,426
15	677750,814	7183805,563	677750,906	7183806,359	-0,092	-0,796	0,801
16	677741,938	7183795,361	677741,640	7183795,114	0,298	0,247	0,387
17	677738,536	7183787,323	677738,920	7183787,674	-0,384	-0,351	0,520
18	677753,862	7183773,442	677754,234	7183774,247	-0,372	-0,805	0,886
19	677749,190	7183762,537	677749,733	7183763,125	-0,543	-0,588	0,801
20	677711,950	7183764,194	677711,805	7183764,597	0,145	-0,403	0,428
21	677708,505	7183756,326	677708,518	7183756,742	-0,013	-0,416	0,416
22	677723,753	7183742,542	677724,093	7183742,784	-0,340	-0,242	0,417
23	677719,190	7183731,892	677719,143	7183732,512	0,047	-0,620	0,621
24	677622,977	7183785,720	677623,294	7183786,224	-0,317	-0,504	0,595
25	677618,414	7183775,072	677618,903	7183775,219	-0,489	-0,147	0,511
26	677643,581	7183784,217	677643,517	7183784,447	0,064	-0,230	0,239
27	677647,021	7183792,192	677646,889	7183792,462	0,132	-0,270	0,301
28	677834,619	7183851,334	677834,819	7183850,748	-0,200	0,587	0,620
29	677829,548	7183839,618	677830,226	7183839,021	-0,678	0,598	0,904
30	677860,256	7183826,328	677860,385	7183825,856	-0,129	0,472	0,489
31	677865,327	7183838,042	677865,697	7183837,527	-0,370	0,515	0,634
32	677858,037	7183759,331	677857,729	7183758,966	0,309	0,365	0,478
33	677834,922	7183768,986	677834,984	7183768,452	-0,062	0,534	0,537
34	677825,307	7183769,468	677825,041	7183769,162	0,267	0,306	0,406
35	677837,859	7183799,486	677838,254	7183799,046	-0,395	0,439	0,591
36	677852,754	7183793,194	677853,133	7183793,296	-0,379	-0,102	0,392
				Média	-0,093	-0,205	0,594
				Desvio Padrão	0,314	0,499	0,194

A figura 19 ilustra as diferenças entre as coordenadas N e E de cada ponto. No gráfico, o eixo vertical diz respeito à diferença das coordenadas N, e o eixo horizontal diz respeito à diferença entre as coordenadas E. O Decreto lei fixa valores máximos para cada classe. Estes valores foram representados sob forma de círculo com raio igual ao valor permitido por classe. Assim, os círculos possuem raios igual aos valores do PEC na quarta coluna (contada da esquerda



para a direita) da tabela 04, em relação à escala 1:2000; que são respectivamente 1m para a classe A, 1,6m para a classe B e 2 m para a classe C. O círculo tracejado mostra a região que engloba 90% das observações dos pontos, lembrando que esta é uma condição para que uma carta seja enquadrada em uma das classes.

FIGURA 19 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS DA BASE CARTOGRAFICA COM O VARREDOR LASER PARA CONSTRUÇÕES



A figura 19 mostra a distribuição dos resíduos obtidos em torno de zero. Percebe-se uma tendência destes pontos, se concentram no terceiro e quarto quadrantes do gráfico. Isto pode ser um indicativo de um erro sistemático, mas de acordo com os testes estatísticos estes resíduos foram normalizados, conforme a tabela 08. Estes pontos foram classificados segundo o PEC como classe A na escala 1:2000. Isto pode ser verificado através do círculo tracejado, que possui um raio de 0,88 metros.

A tabela 10 mostra o resumo dos cálculos estatísticos necessários para verificar a hipótese de normalidade (*K-S Test*) e de coincidência da média com a origem (Teste  $T^2$ ) para as construções vetorizadas sobre a imagem. Verifica-se através do (*K-S Test*), que as diferenças podem ser aproximadas por uma distribuição normal, uma vez que valor calculado pelo teste é maior que 0,05,

indicando que as amostras foram então consideradas normais.

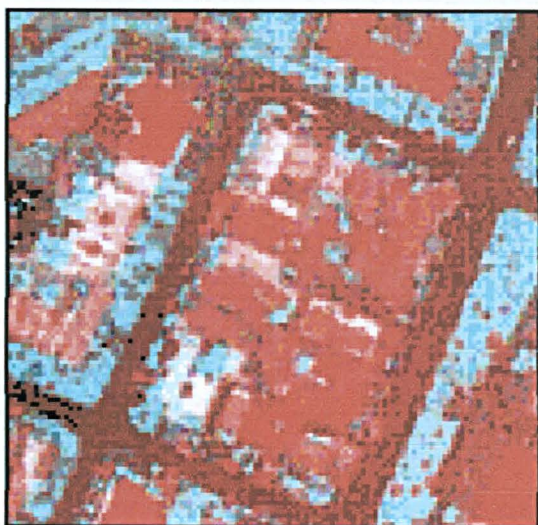
Depois de verificada normalidade dos dados foi verificada a coincidência das médias com a origem. Na tabela 08 o termo “Teste  $T^2$  – lado 01” refere-se ao resultado do lado esquerdo da equação 32 e o termo “Teste  $T^2$  – lado 02” mostra o lado direito da mesma equação. Para a condição de hipótese ser nula ( $H_0$ ), o termo “Teste  $T^2$  – lado 01” da equação 32 tem que ser maior que o termo “Teste  $T^2$  – lado 02”, o que ocorre neste caso. Isto indica um nível de 95% de significância, para os dois tipos de feições digitalizadas, pode ser aceita.

TABELA 10 – AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA VETORIZAÇÃO SOBRE A IMAGEM DERIVADA DO SISTEMA DE VARREDURA A LASER

Feições	Edificações
Normalidade ( <i>K-S Test</i> )	0.639856
Teste $T^2$ – lado 01	421.56
Teste $T^2$ – lado 02	7.2563

Foram realizados testes com outras feições presentes na imagem derivada do varredor laser, como por exemplo as casas. A vetorização destas entidades não foi possível devido ao fato de não serem bem identificáveis na imagem. Na figura 20 nota-se que as edificações de pequeno porte que estão justapostas não é possível realizar a vetorização, sendo difícil à identificação individual de cada edificação.

FIGURA 20 – EXEMPLO DE VETORIZAÇÃO SOBRE EDIFICAÇÕES DE PEQUENO PORTE



A tabela 11 mostra a diferença dos pontos obtidos com a vetorização

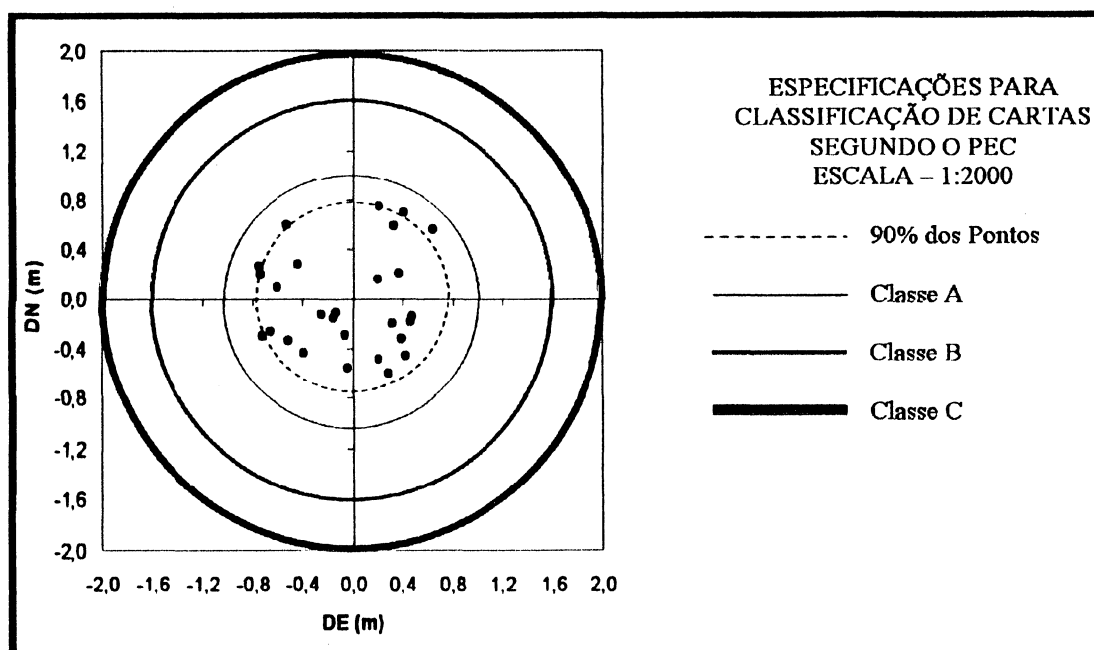
sobre as vias na imagem com o os mesmos pontos pertencentes à base cartográfica digital.

TABELA 11 - DIFERENÇA ENTRE OS PONTOS OBTIDOS NA IMAGEM DE VARREDURA A LASER COM A BASE CARTOGRÁFICA (VIAS)

Pt	BASE		LASER (Vias)		Diferença		Res (m)
	E1 (m)	N1 (m)	E3 (m)	N3(m)	DE(m)	DN(m)	
1	677009.484	7184744.515	677009.523	7184745.075	-0.039	-0.560	0.561
2	677291.718	7184754.517	677291.386	7184753.925	0.332	0.592	0.679
3	677403.461	7184742.707	677404.186	7184743.012	-0.725	-0.305	0.786
4	677575.098	7184669.423	677574.672	7184669.884	0.426	-0.461	0.628
5	677657.933	7184763.792	677657.586	7184763.094	0.347	0.699	0.780
6	677759.832	7184787.449	677760.219	7184787.889	-0.387	-0.440	0.586
7	677874.413	7184531.678	677874.474	7184531.972	-0.061	-0.294	0.300
8	677401.742	7184181.493	677401.453	7184182.095	0.288	-0.602	0.667
9	677416.772	7184162.853	677416.132	7184162.292	0.640	0.561	0.851
10	676455.123	7184155.958	676455.784	7184156.222	-0.661	-0.264	0.711
11	676462.950	7184144.054	676462.580	7184143.845	0.369	0.210	0.425
12	676480.297	7184125.694	676480.807	7184126.035	-0.510	-0.341	0.614
13	676495.093	7184118.044	676495.835	7184117.845	-0.742	0.199	0.769
14	676520.093	7184117.024	676520.845	7184116.757	-0.753	0.267	0.798
15	676508.344	7184105.011	676508.953	7184104.920	-0.609	0.090	0.616
16	676525.816	7184072.438	676525.338	7184072.582	0.478	-0.145	0.500
17	676544.920	7184073.136	676545.357	7184072.856	-0.437	0.280	0.519
18	676546.295	7184060.145	676546.824	7184059.545	-0.528	0.600	0.799
19	676536.934	7184047.301	676536.541	7184047.628	0.394	-0.327	0.512
20	676673.543	7183836.733	676673.218	7183836.936	0.325	-0.203	0.383
21	676716.358	7184111.464	676716.152	7184111.951	0.206	-0.486	0.528
22	676698.100	7184115.242	676697.905	7184115.087	0.195	0.155	0.249
23	676704.544	7184108.934	676704.333	7184108.183	0.211	0.751	0.780
24	676843.513	7183909.035	676843.666	7183909.196	-0.153	-0.161	0.223
25	677835.983	7184736.973	677835.515	7184737.158	0.468	-0.185	0.503
26	677830.045	7184735.489	677830.178	7184735.605	-0.132	-0.116	0.176
27	677809.558	7184750.464	677809.804	7184750.596	-0.247	-0.132	0.280
				Média	-0.048	-0.023	0.564
				Desvio Padrão	0.449	0.405	0.198

Analisando os dados e a figura 21, consta que 90% dos pontos ficaram dentro da circunferência com raio de 0,77 m.

FIGURA 21 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS DA BASE CARTOGRAFICA COM O VARREDOR LASER PARA VIAS



Os resíduos dos pontos ficaram bem distribuídos em torno de zero. Este tipo de vetorização, nas construções e vias, poderia, segundo o critério do PEC, ser usado para gerar mapas classe A na escala 1:2000.

A tabela 12 mostra o resumo dos cálculos estatísticos necessários para verificar a hipótese de normalidade (*K-S Test*) e de coincidência da média com a origem (Teste  $T^2$ ) para as vias vetorizadas sobre a imagem. Verifica-se através do (*K-S Test*), que as diferenças podem ser aproximadas por uma distribuição normal, uma vez que valor calculado pelo teste é maior que 0,05. As amostras foram então consideradas normais. O termo “Teste  $T^2$  – lado 01” refere-se ao resultado do lado esquerdo da tabela da eq. 22 é maior que o termo “Teste  $T^2$  – lado 02” que mostra o lado direito da mesma equação. Sendo assim a condição de hipótese nula ( $H_0$ ), com um nível de 95% de significância, para os dois tipos de feições digitalizadas, pode ser aceita.

TABELA 12 – AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA VETORIZAÇÃO SOBRE A IMAGEM DERIVADA DO SISTEMA DE VARREDURA A LASER

Feições	Vias
Normalidade ( <i>K-S Test</i> )	0.392540
Teste $T^2$ – lado 01	73.56
Teste $T^2$ – lado 02	9.8456

Em ambos os casos, tanto para edificações e para vias, a média para os resíduos ficaram próximos a um píxel da imagem. que tem o tamanho de 0,40 metros no terreno, isto pode ser verificado na tabela 13. No caso das médias com resultados negativos utilizou-se o módulo para calcular o valor em píxel.

TABELA 13 – VALORES DAS MÉDIAS E EMQ CACULADOS EM *PÍXEL*

		$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ ( <i>píxel</i> )	$\Delta N$ ( <i>píxel</i> )
Construções	<i>Média</i>	-0.093	-0.205	0.03	0.09
	<i>Desv. Padrão</i>	0.314	0.499	0.12	0.21
	<i>EMQ</i>		0.594		0.24
Vias	<i>Média</i>	-0.048	-0.023	0.02	0.01
	<i>Desv. Padrão</i>	0.449	0.405	0.18	0.16
	<i>EMQ</i>		0.564		0.22

#### 4.4 MONORRESTITUIÇÃO DIGITAL

Para a aplicação da monorrestituição digital é necessária a realização das orientações interior, exterior aproximada e exterior exata conforme o item 2.3.

A tabela 14 mostra os resíduos da orientação interior realizada sobre a aerofoto. A avaliação pode ser feita da seguinte maneira: a aerofoto analógica foi digitalizada matricialmente com uma resolução de 1000dpi (ou 1000 pontos por polegada). Isto representa que dentro de uma polegada (25,4 mm) existem 1000 pontos. Com isto cada ponto possui uma dimensão de 0,0254 mm, que representa o tamanho do píxel no referencial da imagem. Comparando os valores do desvio padrão calculado com o tamanho do píxel no referencial de imagem, verifica-se que os desvios são menores. Isto indica que as leituras das marcas fiduciais forma satisfatórias.



TABELA 14 – RESÍDUOS DA ORIENTAÇÃO INTERIOR

Marca	Resíduos	
	Vx (mm)	Vy (mm)
1	-0,001	0,002
2	-0,001	0,002
3	0,001	-0,002
4	0,001	-0,002
Média (mm)	0,000	0,001
Desvio Padrão (mm)	0,001	0,002

A seguir foram analisadas as orientações espaciais aproximada e exata da aerofoto através do desvio padrão mostrado nas tabelas 15 e 16 respectivamente.

TABELA 15 – RESÍDUOS DA ORIENTAÇÃO ESPACIAL APROXIMADA

Ponto	Resíduos	
	VE (m)	VN (m)
210	1,586	2,865
3125	-0,379	-2,511
3126	1,586	-1,986
3128	-0,956	-2,658
3129	3,123	0,258
3130	-0,665	5,789
3131	-3,589	0,128
3132	1,025	-4,258
3133	-2,689	-1,002
4108	-0,483	0,453
4109	-3,721	1,583
4110	4,583	-0,196
4111	3,953	2,158
4112	5,258	4,359
4113	-0,237	-1,723
4114	-2,586	1,586
Média (m)	0,451	0,303
Desvio Padrão (m)	2,910	2,692

Tratando-se de um ajustamento de uma transformação linear aproximada, verifica-se que os desvios padrão obtidos estão dentro do esperado, pois os resultados da modelagem dependem do relevo existente na região. Para a realização da orientação espacial exata foram utilizados os mesmos pontos de apoio.

A tabela 16 mostra os resultados obtidos pelo ajustamento na realização da orientação espacial exata. A precisão esperada neste caso é de 0.30 metros no terreno, que corresponde ao valor de um píxel na aerofoto. Levando-se em conta

que a aerofoto possui a escala de 1:6000 e que um pixel corresponde a 25µm, neste caso considerou-se o valor de dois pixels, ou seja, 50 µm. De acordo com a tabela 15, os resíduos nos pontos fotogramétricos estão dentro da precisão estabelecida.

TABELA 16 – RESÍDUOS DA ORIENTAÇÃO ESPACIAL EXATA

Ponto	Resíduos		
	VE (m)	VN (m)	VZ (m)
210	0,016	0,022	0,021
3125	-0,015	-0,031	0,013
3126	0,053	-0,035	0,086
3128	-0,012	-0,051	0,031
3129	0,024	0,039	0,034
3130	-0,027	0,045	0,029
3131	0,008	0,033	0,071
3132	0,028	-0,052	0,086
3133	-0,041	-0,061	0,093
4108	-0,019	0,013	0,065
4109	-0,032	0,011	0,057
4110	0,026	-0,007	0,061
4111	0,085	0,073	0,041
4112	0,014	0,035	0,059
4113	-0,071	-0,018	0,081
4114	-0,048	0,010	0,034
Média (m)	-0,001	0,002	0,054
Desvio Padrão (m)	0,040	0,040	0,025

#### 4.5 VETORIZAÇÃO DAS ENTIDADES

A vetorização da aerofoto digitalizada matricialmente foi realizada sobre a tela do computador. Para isto foi utilizado o programa *MicroStation* e *Descartes*, utilizando uma ferramenta que cria retas conectadas e fechadas no final (*line string*). As feições vetorizadas foram às edificações de grande porte e também as vias, que eram as entidades de interesse para este trabalho.

#### 4.6 RETIFICAÇÃO DO ARQUIVO GRÁFICO

Com o arquivo gráfico (\*.DGN) gerado no item 4.5 e as informações altimétricas derivadas do sistema de varredura a laser, obteve-se um arquivo gráfico retificado, onde as entidades digitalizadas, definidas por coordenadas,

foram transformadas do referencial de desenho para o referencial geodésico.

#### 4.6.1 Resultados da retificação utilizando o modelo digital de superfície derivado de varredura a laser

As tabelas 17 e 18 mostram a diferença dos pontos retirados da monorestituição (retificação do arquivo gráfico) com os mesmos pontos retirados da base, no caso das edificações, utilizando o interpolador vizinho mais próximo e a superfície plana respectivamente. A mesma tabela mostra a resultante de cada ponto levando na retificação.

TABELA 17a – DIFERENÇA ENTRE PONTOS OBTIDOS NA RETIFICAÇÃO COM OS PONTOS DA BASE PARA CONSTRUÇÕES UTILIZANDO O INTERPOLADOR VIZINHO MAIS PRÓXIMO

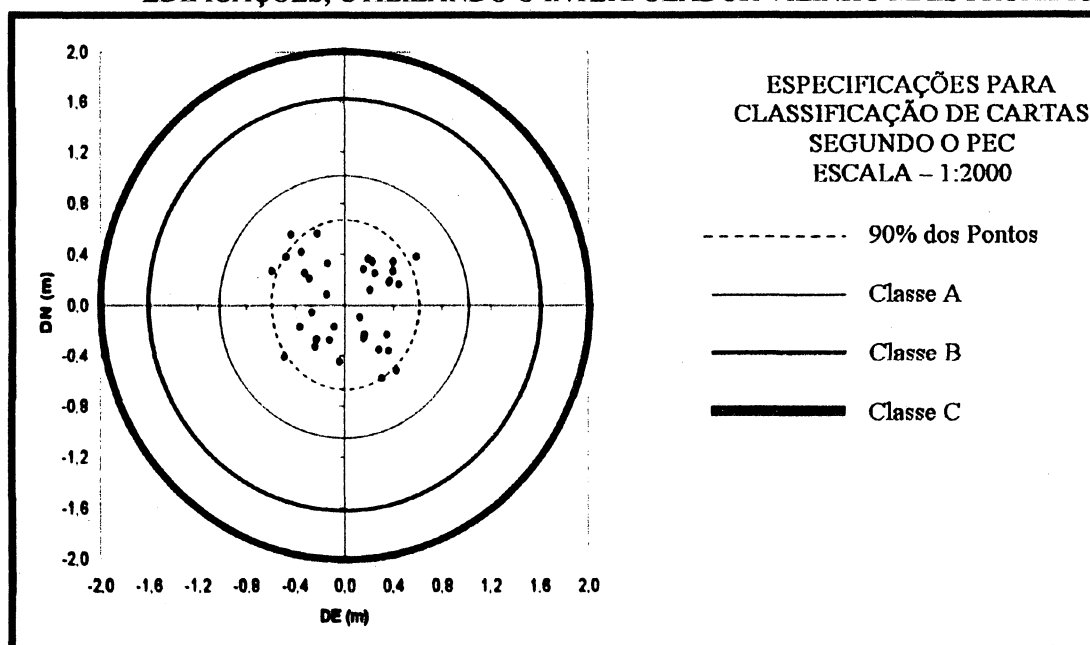
Pt	BASE		MONORRESTITUIÇÃO		Diferença		Res (m)
	E1 (m)	N1 (m)	E4 (m)	N4 (m)	DE(m)	DN(m)	
1	677801,759	7183934,529	677801,358	7183934,190	0,401	0,339	0,525
2	677817,420	7183920,886	677817,786	7183921,066	-0,366	-0,180	0,407
3	677812,870	7183910,261	677812,465	7183909,996	0,405	0,265	0,484
4	677775,107	7183911,736	677774,856	7183911,487	0,251	0,249	0,354
5	677771,515	7183903,439	677771,356	7183903,156	0,159	0,283	0,324
6	677786,868	7183890,300	677787,134	7183890,364	-0,266	-0,064	0,273
7	677782,234	7183879,551	677782,316	7183879,726	-0,082	-0,175	0,193
8	677773,415	7183869,297	677773,186	7183868,956	0,229	0,341	0,411
9	677769,316	7183861,444	677769,556	7183861,776	-0,240	-0,332	0,410
10	677785,391	7183847,257	677785,866	7183846,876	-0,475	0,381	0,609
11	677780,705	7183836,327	677780,742	7183836,784	-0,037	-0,457	0,458
12	677743,444	7183838,265	677743,567	7183838,549	-0,123	-0,284	0,309
13	677739,861	7183829,944	677739,498	7183830,306	0,363	-0,362	0,513
14	677755,503	7183816,470	677755,220	7183816,826	0,283	-0,356	0,455
15	677750,814	7183805,563	677750,687	7183805,662	0,127	-0,099	0,161
16	677741,938	7183795,361	677741,488	7183795,197	0,450	0,164	0,479
17	677738,536	7183787,323	677738,757	7183786,759	-0,221	0,564	0,606
18	677753,862	7183773,442	677754,189	7183773,190	-0,327	0,252	0,413
19	677749,190	7183762,537	677748,759	7183763,057	0,431	-0,520	0,675
20	677711,950	7183764,194	677712,300	7183763,778	-0,350	0,416	0,543
21	677708,505	7183756,326	677708,196	7183756,913	0,309	-0,586	0,663
22	677723,753	7183742,542	677724,186	7183741,986	-0,433	0,556	0,705
23	677719,190	7183731,892	677719,476	7183731,683	-0,286	0,209	0,354
24	677622,977	7183785,720	677622,599	7183785,526	0,378	0,194	0,425
25	677618,414	7183775,072	677618,556	7183774,990	-0,142	0,082	0,164
26	677643,581	7183784,217	677643,806	7183784,490	-0,225	-0,273	0,353
27	677647,021	7183792,192	677646,859	7183792,459	0,162	-0,267	0,312
28	677834,619	7183851,334	677834,249	7183851,157	0,370	0,177	0,411
29	677829,548	7183839,618	677829,199	7183839,859	0,349	-0,241	0,424
30	677860,256	7183826,328	677860,059	7183825,964	0,197	0,364	0,414
31	677865,327	7183838,042	677865,112	7183837,926	0,215	0,117	0,244

**TABELA 17b – DIFERENÇA ENTRE PONTOS OBTIDOS NA RETIFICAÇÃO COM OS PONTOS DA BASE PARA CONSTRUÇÕES UTILIZANDO O INTERPOLADOR VIZINHO MAIS PRÓXIMO**

	BASE		MONORRESTITUIÇÃO		Diferença		Res
32	677858,037	7183759,331	677858,526	7183759,753	-0,489	-0,421	0,646
33	677834,922	7183768,986	677835,059	7183768,659	-0,137	0,327	0,354
34	677825,307	7183769,468	677825,896	7183769,203	-0,589	0,266	0,646
35	677837,859	7183799,486	677837,689	7183799,726	0,170	-0,240	0,294
36	677852,754	7183793,194	677852,159	7183792,811	0,596	0,383	0,708
				Média	0,030	0,030	0,437
				Desvio Padrão	0,329	0,331	0,151

A figura 22 mostra a distribuição dos resíduos e a sua classificação segundo o PEC. Analisando geometricamente o gráfico, o círculo tracejado, que representa 90% dos pontos, teve um raio de 0,60m, isto indica que as edificações retificadas pertencem à escala 1:2000 classe A segundo o PEC, demonstrado na tabela 3.

**FIGURA 22 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS BASE-MONORRESTITUIÇÃO PARA EDIFICAÇÕES, UTILIZANDO O INTERPOLADOR VIZINHO MAIS PRÓXIMO**



Analisando visualmente a figura 22, verifica-se que os resíduos dos pontos ficaram distribuídos em torno da origem e concentrados, porém os resíduos não ficaram próximos à origem. O mesmo ocorre nos próximos testes que serão mostrados. Isto se deve pelo fato do interpolador utilizado, o vizinho mais próximo, não interpolar os valores pertencentes à borda das edificações e o

MDS ser uma interpolação suave. Neste caso, o valor mais próximo da borda que esta no solo foi provavelmente adotado.

A tabela 18 mostra os resíduos obtidos para as edificações utilizando o interpolador superfície plana presente no sistema monorrestituído digital.

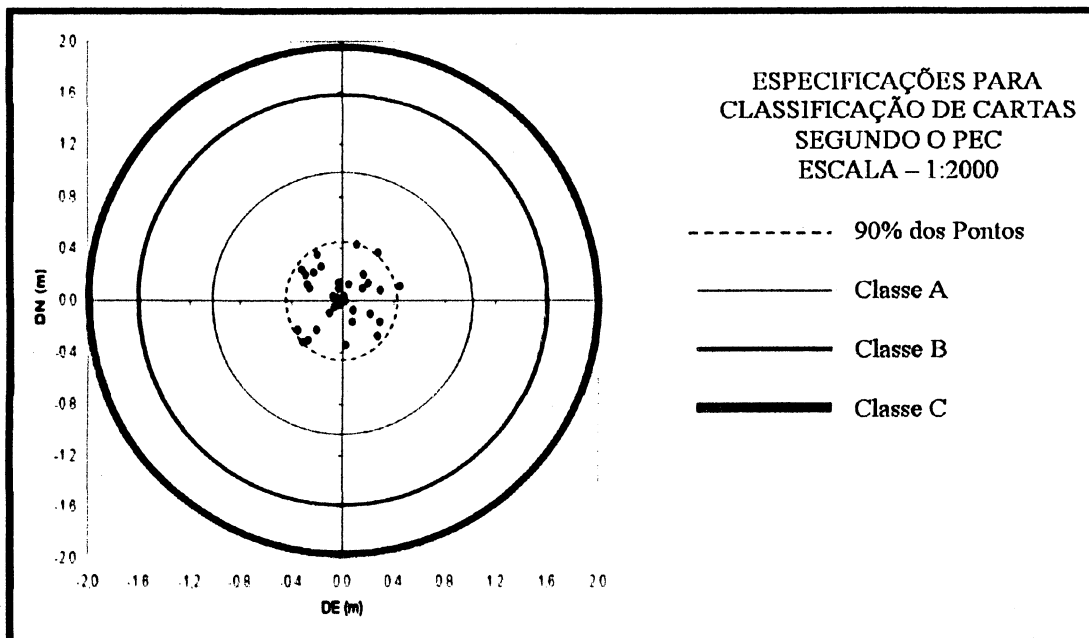
TABELA 18 – DIFERENÇA ENTRE PONTOS OBTIDOS NA RETIFICAÇÃO COM OS PONTOS DA BASE PARA CONSTRUÇÕES UTILIZANDO O INTERPOLADOR SUPERFÍCIE PLANA

Pt	BASE		MONORRESTITUIÇÃO		Diferença		Res
	E1 (m)	N1 (m)	E4 (m)	N4 (m)	DE(m)	DN(m)	(m)
1	677801,759	7183934,529	677801,457	7183934,459	0,302	0,070	0,310
2	677817,420	7183920,886	677817,443	7183920,929	-0,022	-0,043	0,048
3	677812,870	7183910,261	677812,590	7183909,897	0,280	0,365	0,460
4	677775,107	7183911,736	677775,384	7183911,617	-0,277	0,119	0,301
5	677771,515	7183903,439	677771,487	7183903,790	0,028	-0,351	0,352
6	677786,868	7183890,300	677786,857	7183890,276	0,012	0,024	0,027
7	677782,234	7183879,551	677782,486	7183879,459	-0,252	0,092	0,268
8	677773,415	7183869,297	677773,439	7183869,320	-0,024	-0,023	0,033
9	677769,316	7183861,444	677769,159	7183861,359	0,157	0,085	0,179
10	677785,391	7183847,257	677785,659	7183847,572	-0,268	-0,314	0,413
11	677780,705	7183836,327	677780,590	7183835,900	0,115	0,427	0,443
12	677743,444	7183838,265	677743,753	7183838,590	-0,309	-0,325	0,448
13	677739,861	7183829,944	677739,590	7183830,224	0,271	-0,280	0,390
14	677755,503	7183816,470	677755,670	7183816,216	-0,167	0,254	0,304
15	677750,814	7183805,563	677750,359	7183805,459	0,455	0,104	0,467
16	677741,938	7183795,361	677742,259	7183795,126	-0,321	0,235	0,398
17	677738,536	7183787,323	677738,459	7183787,499	0,077	-0,176	0,192
18	677753,862	7183773,442	677754,149	7183773,246	-0,287	0,196	0,348
19	677749,190	7183762,537	677748,896	7183762,712	0,294	-0,175	0,342
20	677711,950	7183764,194	677712,016	7183764,248	-0,066	-0,054	0,085
21	677708,505	7183756,326	677708,853	7183756,563	-0,348	-0,237	0,421
22	677723,753	7183742,542	677723,590	7183742,343	0,163	0,199	0,258
23	677719,190	7183731,892	677719,220	7183731,912	-0,030	-0,020	0,036
24	677622,977	7183785,720	677622,759	7183785,832	0,218	-0,112	0,245
25	677618,414	7183775,072	677618,453	7183775,059	-0,039	0,013	0,041
26	677643,581	7183784,217	677643,607	7183784,126	-0,025	0,091	0,095
27	677647,021	7183792,192	677647,050	7183792,056	-0,029	0,136	0,139
28	677834,619	7183851,334	677834,825	7183851,569	-0,206	-0,235	0,313
29	677829,548	7183839,618	677829,345	7183839,490	0,203	0,129	0,240
30	677860,256	7183826,328	677860,326	7183826,299	-0,070	0,029	0,075
31	677865,327	7183838,042	677865,245	7183838,124	0,082	-0,081	0,115
32	677858,037	7183759,331	677857,986	7183759,216	0,052	0,115	0,126
33	677834,922	7183768,986	677835,025	7183769,090	-0,103	-0,104	0,146
34	677825,307	7183769,468	677825,290	7183769,479	0,017	-0,011	0,020
35	677837,859	7183799,486	677838,058	7183799,136	-0,200	0,350	0,403
36	677852,754	7183793,194	677852,976	7183792,987	-0,221	0,208	0,303
				Média	-0,015	0,020	0,244
				Desvio Padrão	0,207	0,199	0,147

A figura 23 mostra a distribuição dos resíduos e a sua classificação

segundo o PEC. Analisando o gráfico, o círculo tracejado, que representa 90% dos pontos, teve um raio de 0,43 m, isto indica que as edificações retificadas pertencem à escala 1:2000 classe A, conforme a tabela 3.

**FIGURA 23 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS BASE-MONORRESTITUIÇÃO PARA EDIFICAÇÕES, UTILIZANDO O INTERPOLADOR SUPERFÍCIE PLANA**



Analisando a figura 23 percebe-se que as discrepâncias dos pontos retificados utilizando o interpolador superfície plana ficaram em torno do eixo dos zeros. Estes resultados foram melhores, tanto visualmente quanto numericamente, melhores que o interpolador superfície plana demonstrado na figura 22 e tabelas 17 a e b.

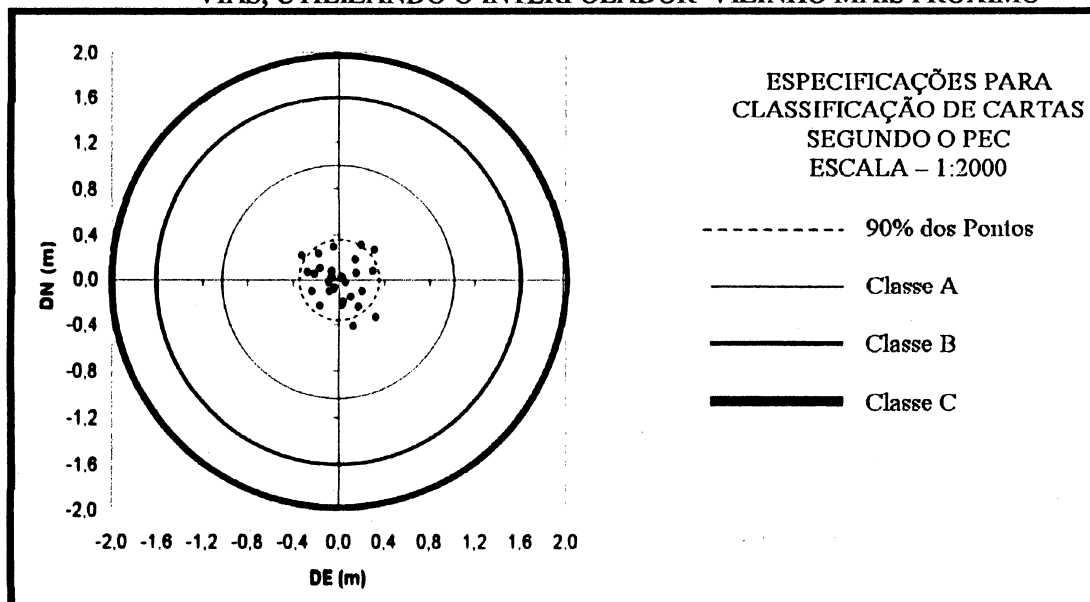
As tabelas 19 e 20 mostram o resíduos dos pontos retirados da retificação no caso das vias utilizando o interpolador vizinho mais próximo e o superfície plana, pode-se ver também na tabela a resultante calculada para os pontos

**TABELA 19 – DIFERENÇA ENTRE PONTOS OBTIDOS NA RETIFICAÇÃO COM OS PONTOS DA BASE PARA VIAS, UTILIZANDO O INTERPOLADOR VIZINHO MAIS PRÓXIMO**

Pt	BASE		MONORRESTITUIÇÃO		Diferença		Res
	E1 (m)	N1 (m)	E4 (m)	N4 (m)	DE(m)	DN(m)	(m)
1	677719.255	7183669.922	677718,940	7183669,659	0,315	0,263	0,410
2	677726.450	7183714.837	677726,426	7183714,813	0,024	0,024	0,033
3	677754.734	7183641.168	677754,794	7183641,147	-0,061	0,021	0,064
4	677756.497	7183774.023	677756,734	7183774,128	-0,237	-0,105	0,259
5	677805.465	7183908.954	677805,553	7183909,064	-0,088	-0,110	0,141
6	677849.583	7183964.080	677849,634	7183963,792	-0,050	0,289	0,293
7	677544.525	7183806.966	677544,709	7183806,740	-0,184	0,225	0,291
8	677567.348	7183859.398	677567,291	7183859,428	0,057	-0,030	0,065
9	677715.082	7183748.819	677714,937	7183748,647	0,145	0,172	0,225
10	677719.180	7183765.920	677719,028	7183765,864	0,152	0,056	0,162
11	677744.128	7183757.807	677744,407	7183757,743	-0,279	0,064	0,286
12	677863.346	7183828.113	677863,405	7183828,042	-0,059	0,071	0,093
13	677865.088	7183840.845	677865,177	7183840,868	-0,090	-0,023	0,093
14	677866.590	7183838.462	677866,629	7183838,533	-0,039	-0,071	0,081
15	677829.839	7183826.149	677830,004	7183826,051	-0,165	0,098	0,192
16	677789.226	7183743.639	677789,049	7183743,883	0,177	-0,245	0,302
17	677814.739	7183762.618	677814,907	7183762,850	-0,168	-0,232	0,287
18	677816.314	7183766.049	677816,016	7183765,972	0,298	0,076	0,308
19	677812.513	7183768.431	677812,318	7183768,125	0,194	0,306	0,362
20	677800.255	7183765.898	677800,475	7183765,853	-0,220	0,045	0,224
21	677796.162	7183770.925	677796,488	7183770,714	-0,326	0,210	0,388
22	677745.686	7183724.863	677745,555	7183725,281	0,132	-0,418	0,438
23	677620.686	7183567.239	677620,731	7183567,331	-0,045	-0,092	0,102
24	677631.622	7183592.933	677631,582	7183593,133	0,040	-0,200	0,204
25	677663.968	7183640.220	677663,859	7183640,374	0,109	-0,154	0,189
26	677669.563	7183647.255	677669,529	7183647,477	0,034	-0,222	0,225
27	677681.837	7183657.681	677681,632	7183657,786	0,205	-0,105	0,230
28	677698.132	7183668.987	677697,800	7183669,327	0,332	-0,340	0,475
				Média	0,007	-0,015	0,182
				Desvio Padrão	0,182	0,189	0,120

A figura 24 mostra a distribuição dos resíduos dos pontos da tabela 16 e a sua classificação segundo o PEC.

**FIGURA 24 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS BASE-MONORRESTITUIÇÃO PARA VIAS, UTILIZANDO O INTERPOLADOR VIZINHO MAIS PRÓXIMO**



Analisando geometricamente a figura 24, o círculo tracejado, que representa 90% dos pontos, tem um raio de 0,38 m, isto indica que as vias retificadas pertencem à escala 1:2000 classe A. Analisando visualmente o gráfico, verifica-se que os resíduos dos pontos ficaram distribuídos, todos em torno do ponto (0,0).

A tabela 20 mostra os resíduos obtidos para as vias utilizando o interpolador superfície plana presente no sistema monorestituído digital.

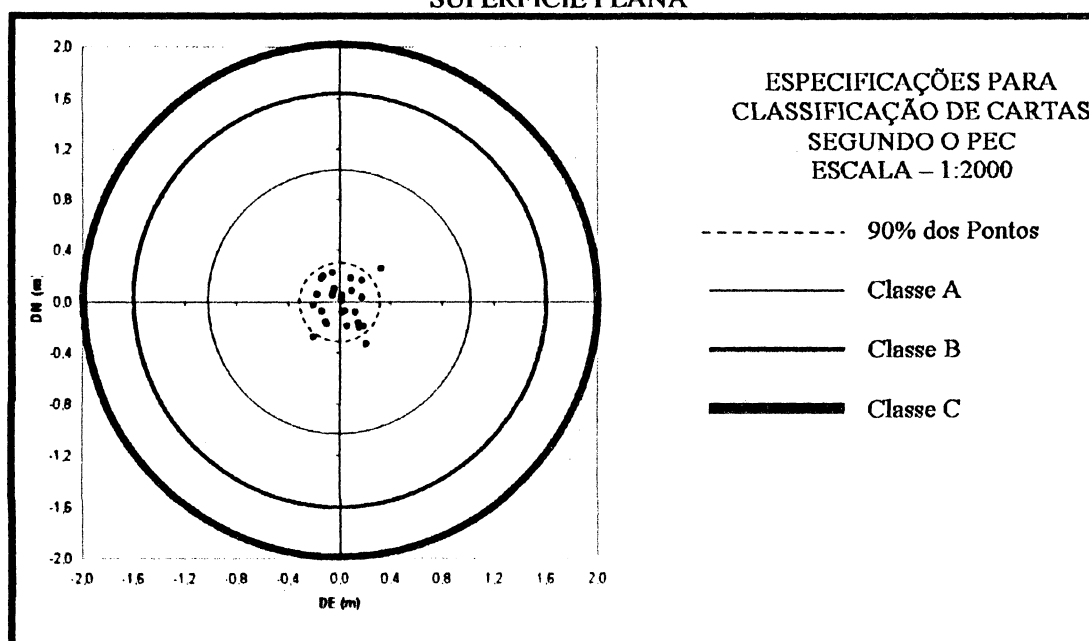


**TABELA 20 – DIFERENÇA ENTRE PONTOS OBTIDOS NA RETIFICAÇÃO COM OS  
PONTOS DA BASE PARA VIAS, PARA VIAS UTILIZANDO O  
INTERPOLADOR SUPERFÍCIE PLANA**

Pt	BASE		MONORRESTITUIÇÃO		Diferença		Res (m)
	E1 (m)	N1 (m)	E4 (m)	N4 (m)	DE(m)	DN(m)	
1	677719,255	7183669,922	677719,236	7183669,897	0,019	0,026	0,032
2	677726,450	7183714,837	677726,499	7183714,790	-0,049	0,047	0,068
3	677754,734	7183641,168	677754,710	7183641,259	0,024	-0,090	0,094
4	677756,497	7183774,023	677756,377	7183774,109	0,120	-0,086	0,147
5	677805,465	7183908,954	677805,590	7183908,759	-0,125	0,195	0,232
6	677849,583	7183964,080	677849,537	7183964,159	0,046	-0,078	0,091
7	677544,525	7183806,966	677544,629	7183807,126	-0,104	-0,160	0,191
8	677567,348	7183859,398	677567,259	7183859,216	0,089	0,183	0,203
9	677715,082	7183748,819	677715,126	7183748,750	-0,044	0,069	0,081
10	677719,180	7183765,920	677719,029	7183766,125	0,151	-0,205	0,255
11	677744,128	7183757,807	677744,326	7183757,839	-0,198	-0,031	0,201
12	677863,346	7183828,113	677863,326	7183828,106	0,020	0,007	0,022
13	677865,088	7183840,845	677865,259	7183840,790	-0,171	0,055	0,180
14	677866,590	7183838,462	677866,626	7183838,370	-0,036	0,092	0,099
15	677829,839	7183826,149	677829,659	7183825,986	0,181	0,164	0,244
16	677789,226	7183743,639	677789,424	7183743,921	-0,197	-0,283	0,345
17	677814,739	7183762,618	677814,529	7183762,953	0,210	-0,335	0,395
18	677816,314	7183766,049	677816,126	7183766,246	0,188	-0,197	0,273
19	677812,513	7183768,431	677812,495	7183768,385	0,017	0,046	0,049
20	677800,255	7183765,898	677800,390	7183765,716	-0,135	0,183	0,227
21	677796,162	7183770,925	677796,065	7183770,843	0,096	0,082	0,127
22	677745,686	7183724,863	677745,360	7183724,613	0,326	0,250	0,411
23	677620,686	7183567,239	677620,826	7183567,320	-0,140	-0,080	0,161
24	677631,622	7183592,933	677631,564	7183593,126	0,058	-0,193	0,201
25	677663,968	7183640,220	677663,823	7183640,390	0,145	-0,170	0,223
26	677669,563	7183647,255	677669,612	7183647,037	-0,049	0,218	0,224
27	677681,837	7183657,681	677681,933	7183657,863	-0,096	-0,182	0,206
28	677698,132	7183668,987	677697,956	7183668,955	0,176	0,032	0,179
				Média	0,019	-0,016	0,115
				Desvio Padrão	0,138	0,160	0,100

A figura 25 mostra a distribuição dos resíduos e a sua classificação segundo o PEC.

FIGURA 25 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS BASE-MONORRESTITUIÇÃO PARA VIAS, UTILIZANDO O INTERPOLADOR SUPERFÍCIE PLANA



Analisando a figura 25, o círculo tracejado, que representa 90% dos pontos, tem um raio de 0,29 m, isto indica que as edificações retificadas pertencem à escala 1:2000 classe A, conforme a tabela 3.

Na tabela 21 estão os resultados estatísticos obtidos para cada feição. É verificado segundo o teste  $T^2$ , que as médias são iguais a zero. O termo “Teste  $T^2$  – lado 01” refere-se ao resultado do lado esquerdo da tabela da eq. 22 é maior que o termo “Teste  $T^2$  – lado 02” que mostra o lado direito da mesma equação. Sendo assim a condição de hipótese nula ( $H_0$ ), com um nível de 95% de significância, para os dois tipos de feições digitalizadas.

No primeiro caso, a da verificação da normalidade, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (*K-S Teste*). A resposta deste teste é um valor de probabilidade, sendo que o resultado tem que ser maior que 0,05, para se confirmar o valor de normalidade dos dados. Depois de verificada e validada a normalidade dos dados o próximo teste é o da verificação da hipótese. É utilizado o teste estatístico  $T^2$  de Hoetling. Este teste verifica que a média da amostra coincide com a origem, ou seja, é nula. Sendo aceita a hipótese nula ao nível de

significância de  $\alpha = 95\%$ , isto significa que a maior parte das observações se concentra em torno de (0,0). Caso contrário, se a hipótese nula for rejeitada, a média das amostras não estão próxima de (0,0).

**TABELA 21 – AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DAS FEIÇÕES RETIFICADAS COM INFORMAÇÕES ALTIMÉTRICAS DERIVADAS DO SISTEMA DE VARREDURA A LASER**

<b>Interpolador</b>	<b>Vizinho MaisPróximo</b>		<b>Superfície Plana</b>	
<b>Feições</b>	<b>Edificações</b>	<b>Vias</b>	<b>Edificações</b>	<b>Vias</b>
Média de $\Delta E$ (m)	0,030	0,007	-0,015	0,019
Desvio Padrão $\Delta E$ (m)	0,329	0,182	0,207	0,138
Média de $\Delta N$ (m)	0,030	-0,015	0,020	-0,016
Desvio Padrão $\Delta N$ (m)	0,331	0,189	0,199	0,160
EMQ	0,437	0,182	0,244	0,114
Normalidade ( <i>K-S Test</i> )	0,557	0,524	0,512	0,759
Teste $T^2$ – lado 01	313,586	35,789	311,732	42,563
Teste $T^2$ – lado 02	10,569	8,587	9,375	9,158

As tabelas 22 e 23 apresentam os resíduos da monorrestituição realizada sobre as edificações de pequeno porte (casas de até dois pavimentos e pequena área) utilizando o interpolador vizinho mais próximo e o superfície triangular plana. Verifica-se através dos seus erros médios quadráticos que ambos ficaram entre os resultados obtidos com a monorrestituição sobre edificações de grandes portes e vias.

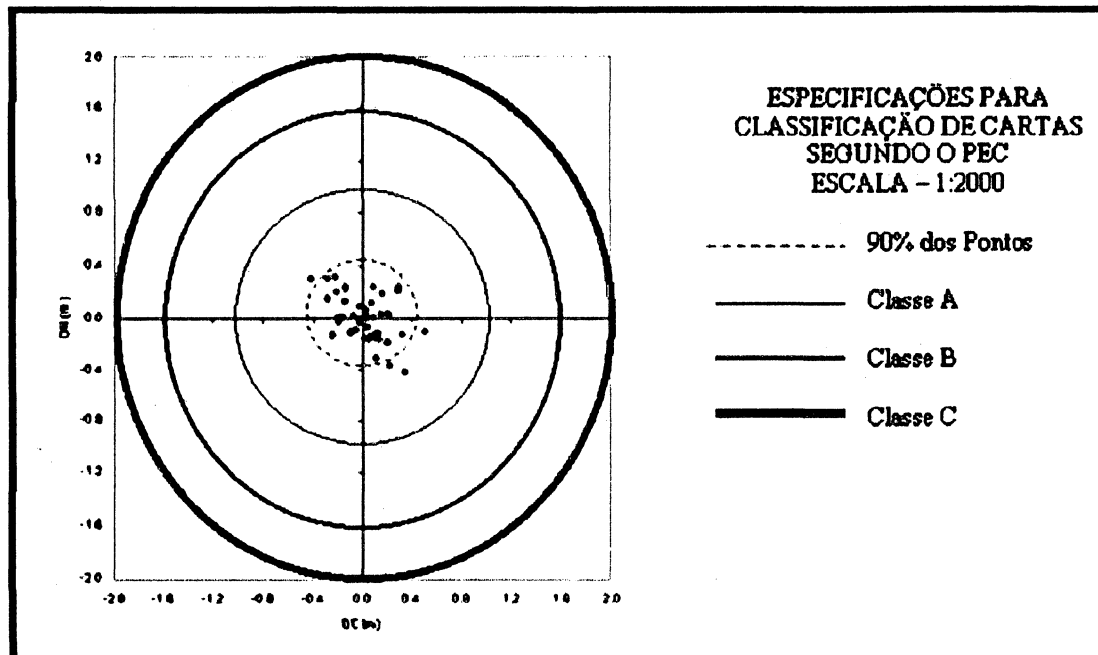
**TABELA 22 – DIFERENÇA ENTRE PONTOS OBTIDOS NA RETIFICAÇÃO COM OS PONTOS DA BASE PARA CASAS, UTILIZANDO O INTERPOLADOR VIZINHO MAIS PRÓXIMO**

Pt	BASE		MONORRESTITUIÇÃO		Diferença		Res (m)
	E1 (m)	N1 (m)	E4 (m)	N4 (m)	DE(m)	DN(m)	
1	677852,149	7183706,323	677852,044	7183706,480	0,105	-0,157	0,189
2	677867,878	7183701,178	677867,735	7183701,347	0,143	-0,169	0,222
3	677863,208	7183690,103	677863,259	7183690,195	-0,051	-0,091	0,105
4	677861,016	7183684,356	677860,990	7183684,299	0,025	0,057	0,063
5	677858,709	7183679,099	677858,986	7183678,796	-0,277	0,303	0,411
6	677854,167	7183676,521	677854,293	7183676,286	-0,126	0,235	0,267
7	677852,721	7183673,227	677852,955	7183673,366	-0,234	-0,139	0,272
8	677855,661	7183671,958	677855,930	7183671,816	-0,268	0,142	0,304
9	677853,906	7183667,955	677853,866	7183668,026	0,041	-0,071	0,081
10	677852,307	7183664,315	677852,096	7183664,510	0,211	-0,195	0,287
11	677849,449	7183665,569	677849,159	7183665,356	0,291	0,213	0,360
12	677848,529	7183663,472	677848,223	7183663,229	0,306	0,243	0,391
13	677850,121	7183660,998	677850,103	7183661,155	0,018	-0,157	0,158
14	677848,509	7183657,327	677848,413	7183657,318	0,097	0,009	0,097
15	677839,713	7183661,188	677839,656	7183661,348	0,057	-0,160	0,170
16	677832,432	7183664,384	677832,495	7183664,367	-0,063	0,017	0,065
17	677834,698	7183669,542	677834,489	7183669,513	0,209	0,029	0,212
18	677831,289	7183672,898	677831,126	7183672,713	0,163	0,185	0,247
19	677833,025	7183677,124	677832,516	7183677,225	0,509	-0,102	0,519
20	677834,572	7183680,651	677834,658	7183680,763	-0,086	-0,112	0,141
21	677838,867	7183678,766	677838,890	7183678,670	-0,023	0,097	0,099
22	677833,500	7183683,465	677833,449	7183683,458	0,051	0,007	0,051
23	677835,964	7183689,080	677836,369	7183688,779	-0,405	0,302	0,505
24	677837,669	7183688,332	677837,515	7183688,303	0,154	0,030	0,157
25	677839,135	7183691,675	677839,040	7183691,439	0,095	0,236	0,254
26	677840,382	7183695,294	677840,299	7183695,179	0,084	0,115	0,142
27	677842,158	7183699,340	677842,355	7183699,145	-0,198	0,195	0,277
28	677848,381	7183697,737	677848,027	7183698,165	0,354	-0,429	0,556
29	677852,149	7183706,323	677852,356	7183706,016	-0,207	0,306	0,370
30	677861,129	7183702,356	677861,146	7183702,386	-0,017	-0,030	0,034
31	677849,564	7183655,899	677849,697	7183655,774	-0,133	0,125	0,183
32	677845,985	7183647,753	677845,656	7183647,880	0,329	-0,127	0,352
33	677839,309	7183631,123	677839,469	7183631,114	-0,160	0,009	0,160
34	677820,887	7183639,196	677820,899	7183639,206	-0,012	-0,010	0,016
35	677808,992	7183644,024	677808,865	7183644,146	0,127	-0,121	0,176
36	677799,027	7183648,260	677798,799	7183648,637	0,228	-0,377	0,440
37	677804,637	7183661,458	677804,570	7183661,601	0,067	-0,143	0,158
38	677812,599	7183658,074	677812,485	7183658,392	0,114	-0,318	0,338
39	677811,340	7183655,121	677811,526	7183655,154	-0,186	-0,033	0,189
40	677813,346	7183654,268	677813,527	7183654,257	-0,180	0,011	0,181
				Média	0,029	-0,002	0,230
				Desvio Padrão	0,197	0,183	0,138

Para o caso em que foi utilizado o interpolador vizinho mais próximo, obteve-se um erro médio quadrático de 0,230, ficando entre 0,437 e 0,182 que são os erros médios quadráticos das construções de grande porte e vias

respectivamente. A figura 26 mostra a distribuição dos resíduos e a sua classificação segundo o PEC.

**FIGURA 26 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS BASE-MONORRESTITUIÇÃO PARA CASAS, UTILIZANDO O INTERPOLADOR VIZINHO MAIS PRÓXIMO**



Analisando a figura 26, o círculo tracejado, que representa 90% dos pontos, teve um raio de 0,44 m, isto indica que as casas retificadas pertencem à escala 1:2000 classe A, conforme a tabela 3.

A tabela 23 mostra o cálculo e as diferenças entre pontos obtidos na retificação com os pontos da base para casas, utilizando o interpolador Superfície plana.

**TABELA 23 – DIFERENÇA ENTRE PONTOS OBTIDOS NA RETIFICAÇÃO COM OS PONTOS DA BASE PARA CASAS, UTILIZANDO O INTERPOLADOR SUPERFÍCIE PLANA**

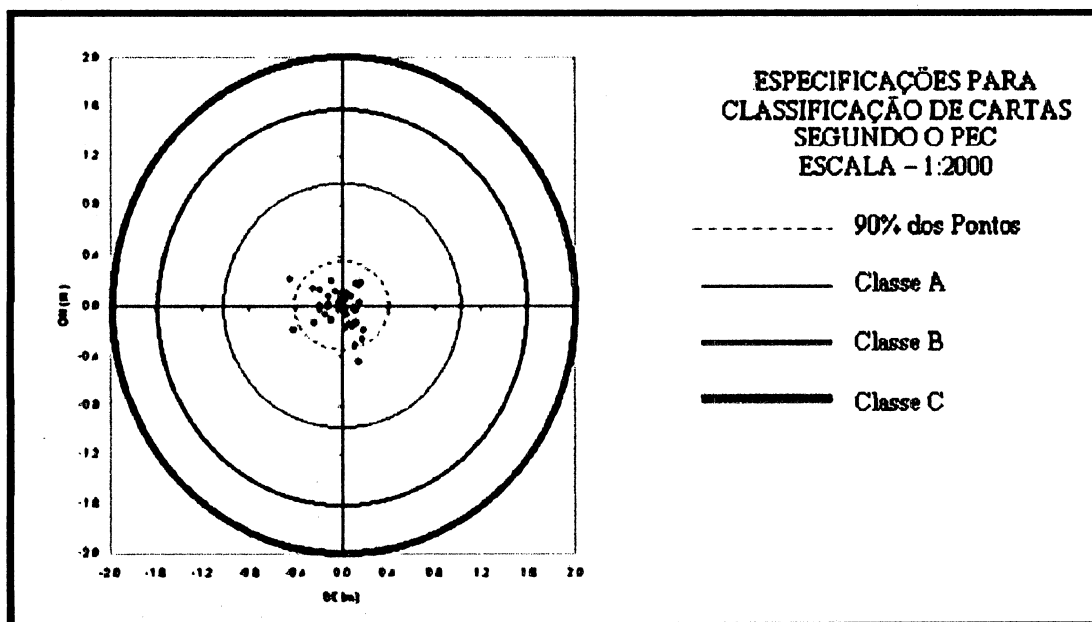
Pt	BASE		MONORRESTITUIÇÃO		Diferença		Res
	E1 (m)	N1 (m)	E4 (m)	N4 (m)	DE(m)	DN(m)	
1	677852,149	7183706,323	677851,964	7183706,590	0,185	-0,267	0,325
2	677867,878	7183701,178	677867,690	7183701,366	0,188	-0,188	0,266
3	677863,208	7183690,103	677863,620	7183690,289	-0,411	-0,185	0,451
4	677861,016	7183684,356	677860,987	7183684,299	0,029	0,057	0,064
5	677858,709	7183679,099	677858,963	7183678,966	-0,254	0,133	0,287
6	677854,167	7183676,521	677854,259	7183676,326	-0,092	0,195	0,216
7	677852,721	7183673,227	677852,955	7183673,366	-0,234	-0,139	0,272
8	677855,661	7183671,958	677855,690	7183671,996	-0,028	-0,038	0,047
9	677853,906	7183667,955	677853,866	7183668,026	0,041	-0,071	0,081
10	677852,307	7183664,315	677852,156	7183664,760	0,150	-0,445	0,469
11	677849,449	7183665,569	677849,299	7183665,406	0,151	0,163	0,222
12	677848,529	7183663,472	677848,403	7183663,299	0,126	0,173	0,214
13	677850,121	7183660,998	677850,013	7183661,025	0,108	-0,027	0,112
14	677848,509	7183657,327	677848,513	7183657,258	-0,003	0,069	0,069
15	677839,713	7183661,188	677839,856	7183661,258	-0,143	-0,070	0,160
16	677832,432	7183664,384	677832,615	7183664,257	-0,183	0,127	0,223
17	677834,698	7183669,542	677834,599	7183669,713	0,100	-0,171	0,197
18	677831,289	7183672,898	677831,126	7183672,713	0,163	0,185	0,247
19	677833,025	7183677,124	677832,986	7183677,025	0,039	0,098	0,106
20	677834,572	7183680,651	677834,658	7183680,763	-0,086	-0,112	0,141
21	677838,867	7183678,766	677838,790	7183678,690	0,077	0,077	0,109
22	677833,500	7183683,465	677833,559	7183683,358	-0,059	0,107	0,122
23	677835,964	7183689,080	677836,079	7183688,999	-0,115	0,082	0,141
24	677837,669	7183688,332	677837,515	7183688,303	0,154	0,030	0,157
25	677839,135	7183691,675	677839,140	7183691,569	-0,005	0,106	0,106
26	677840,382	7183695,294	677840,499	7183695,279	-0,116	0,015	0,117
27	677842,158	7183699,340	677842,595	7183699,125	-0,438	0,215	0,487
28	677848,381	7183697,737	677848,275	7183697,745	0,106	-0,009	0,107
29	677852,149	7183706,323	677852,026	7183706,456	0,123	-0,133	0,181
30	677861,129	7183702,356	677861,146	7183702,386	-0,017	-0,030	0,034
31	677849,564	7183655,899	677849,597	7183655,874	-0,033	0,025	0,042
32	677845,985	7183647,753	677845,956	7183647,790	0,029	-0,037	0,047
33	677839,309	7183631,123	677839,299	7183631,114	0,010	0,009	0,014
34	677820,887	7183639,196	677820,999	7183639,206	-0,112	-0,010	0,113
35	677808,992	7183644,024	677808,865	7183644,046	0,127	-0,021	0,129
36	677799,027	7183648,260	677798,999	7183648,437	0,029	-0,177	0,179
37	677804,637	7183661,458	677804,570	7183661,601	0,067	-0,143	0,158
38	677812,599	7183658,074	677812,485	7183658,392	0,114	-0,318	0,338
39	677811,340	7183655,121	677811,526	7183655,154	-0,186	-0,033	0,189
40	677813,346	7183654,268	677813,527	7183654,257	-0,180	0,011	0,181
				Média	-0,015	-0,019	0,178
				Desvio Padrão	0,154	0,146	0,115

No caso em que foi utilizado o interpolador superfície plana, ele teve um erro médio quadrático de 0,178, ficando entre 0,244, que foi o erro médio quadrático para construções de grande porte e 0,144, onde foi o erro médio

quadrático obtido para as vias.

A figura 27 mostra a distribuição dos resíduos e a sua classificação segundo o PEC.

FIGURA 27 – RESÍDUOS DAS COORDENADAS BASE-MONORRESTITUIÇÃO PARA CASAS, UTILIZANDO O INTERPOLADOR SUPERFÍCIE PLANA



Analisando a figura 27, o círculo tracejado, que representa 90% dos pontos, teve um raio de 0,31 m, isto indica que as casa retificadas pertencem à escala 1:2000 classe A, conforme a tabela 3.

#### 4.7 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A tabela 24 apresenta uma comparação entre a digitalização realizada sobre a imagem de varredura laser e a monorrestituição. Utilizou-se o PEC para avaliar os dois métodos, ou seja, 90% dos pontos tem que estar com o raio abaixo de um metro que é a classificação para a classe A na escala 1:2000.

**TABELA 24 – RAO DE 90% DOS PONTOS SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO DE CARTAS DO PEC.**

		Edificações de grande porte (m)	Vias (m)
Digitalização		0,88	0,77
Monorrestituição	Vizinho mais próximo	0,60	0,38
	Superfície Plana	0,43	0,29

Verifica-se que a monorrestituição é melhor que a digitalização sobre a imagem obtida por varredura a laser nos dois casos propostos. Ocorre uma diferença significativa entre os resultados obtidos com a digitalização sobre a imagem derivada do laser e com a monorrestituição. Nota-se que o resultado obtido com a monorrestituição utilizando o interpolador superfície plana obteve resultados melhores. A tabela 25 apresenta a avaliação dos erros de acordo com o Erro Médio Quadrático dos testes realizados. Este tipo de avaliação esta presente na tabela 03, onde apresenta a classificação das cartas segundo o erro padrão de acordo com o Decreto Lei 89817 de 20 de junho de 1984. Os resultados avaliados consideram qual para uma carta ser avaliada como classe A na escala 1:2000 os erros padrões tem que possuir no terreno um resultado menor que sessenta centímetros..

**TABELA 25 – CLASSIFICAÇÃO DE CARTAS SEGUNDO O ERRO MÉDIO QUADRÁTICO**

		Edificações de grande porte	Vias
Digitalização		0,594	0,514
Monorrestituição	Vizinho mais próximo	0,437	0,182
	Superfície Plana	0,244	0,114

Estes resultados só confirmam os resultados obtidos e avaliados na tabela 20. A monorrestituição realizada com o interpolador superfície plana obteve os melhores resultados e foi verificado também que os três métodos utilizados obtiveram resultados para a classe A na escala 1:2000. O que foi a avaliação obtida utilizando o PEC.



## **5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **Conclusões:**

- Dados do sistema de varredura a laser podem ser utilizados em diversos trabalhos que necessitem de dados bidimensionais, pois possuem uma boa geometria planimétrica.
- Imagens obtidas através dos dados do sistema de varredura a laser, como do primeiro e do último retorno de cada pulso e imagem intensidade, podem ser processadas ou trabalhadas individualmente ou fazer uma composição colorida dependendo da finalidade. A composição colorida (R= Primeiro Pulso, G= Último Pulso, B= Imagem Intensidade) é a que se mostrou mais apropriada para uma melhor definição das bordas das edificações e vias presentes na região.
- Para algumas feições, é possível realizar mapeamento na escala 1:2000 sobre imagens obtidas com dados do sistema de varredura a laser no caso de construções de grande porte e vias. Isto ocorre devido ao fato da facilidade de vetorizar sobre as bordas que são melhor definidas com a composição colorida das imagens. Outro fator importante que contribuiu é o formato da imagem escolhido, a GeoTiff, cujo formato permite que a imagem já esteja referenciada a um sistema de projeção conhecido.
- No caso da vetorização da imagem de varredura a laser sobre as vias, os resíduos foram menores que os resíduos das construções. Isto ocorreu devido à fronteira das vias estarem mais bem definidas visualmente que as edificações de grande porte.
- A desvantagem das imagens derivadas do sistema de varredura laser está na redução da quantidade de objetos facilmente identificáveis. Em geral as edificações de grande porte, como prédios e barracões.

No caso das edificações pequenas, como as casas, elas não podem ser identificadas, a não ser quando elas aparecem isoladas.

- A utilização do Sistema Monorestituído Digital possui algumas vantagens em relação a estereorestituição, como a facilidade operacional, o usuário requer um curto período de tempo para se familiarizar com o sistema e dependendo da aplicação, podem ser obtidos resultados equivalentes a uma estereorestituição. É um sistema que possui baixo custo e não requer conhecimentos muito específicos do *Software MicroStation* para aplicá-lo.
- A desvantagem do monorestituído é a sua dependência da qualidade de um modelo digital de superfície. No caso deste trabalho, foi utilizado o modelo digital de superfície (MDS) derivado dos dados do Sistema de Varredura a Laser. O resultados obtidos com a monorrestituição utilizando o interpolador superfície plana foram melhor parametrizados que os resultados obtidos utilizando o interpolador vizinho mais próximo. No caso das vias o interpolador não afetou devido ao fato das altitudes dos vizinhos serem as mesmas. Porém no caso das edificações, o sistema em vez de utilizar o valor da altitude da borda no MDS, pode eventualmente usar o valor de um vizinho próximo, mas localizado fora da construção.
- Verificou-se através dos resultados obtidos que a monorrestituição realizada com o interpolador superfície triangular plana, utilizando o modelo digital de superfície derivado do varredor laser, pode-se realizar um mapeamento de edificações de grande porte equivalente ao estereofotogramétrico.

### **Recomendações:**

- Verificar a eficiência desta metodologia utilizando outras áreas de teste e também avaliar a metodologia utilizando fotografias aéreas obtidas com câmaras de pequeno formato.
- Avaliar a representação do MDS no formato TIN, para preservar as bordas e automatizar o processo de vetorização na monorrestituição.
- Antes de iniciar a trabalhar com dados do varredor laser, verificar a qual sistema de referência ele pertence e também verificar os dados do dia do levantamento, afim de se ter uma boa informação sobre os dados que serão utilizados.
- Ao trabalhar com imagens derivadas do Sistema de Varredura a Laser, sempre que possível, realizar um estudo preliminar nas imagens e verificar se elas estão de acordo com o trabalho a ser realizado.
- No caso em que se deseja realizar uma vetorização sobre uma imagem derivada do varredor laser na tela de um computador, recomenda-se realizar um processamento digital na imagem afim de que as bordas das edificações sejam ressaltadas e fique mais fácil a digitalização sobre a mesma.
- Procurar utilizar a melhor configuração de vídeo e placa gráfica, para melhor visualização dos detalhes tanto na imagem derivada do varredor laser como nas fotos aéreas analógicas “*scannerizadas*”.
- Procurar utilizar dados pontuais, tais como esquinas de meio fio ou encontro de eixos viários, derivados do varredor laser como pontos de apoio utilizados na monorrestituição.
- Quando utilizar o procedimento da monorrestituição com o modelo digital de superfície derivado do varredor laser, verificar se as feições presentes na arofoto estão representadas no modelo digital.

## REFERÊNCIAS

ACKERMANN, F., **Airbone laser scanning – present status & future expectation**. ISPRS Journal os Photogrammetry & Remote Sensing, vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, 2000, pp 64-67.

ANDRADE, J. B., **Fotogrametria**. 1ª ed. Curitiba, Editora UFPR, 1998.

BALTSAVIAS, E. P., **Airbone Laser Scanning: Basic Relation and Formulas**. ISPRS Journal os Photogrammetry & Remote Sensing, vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, 2000, pp 199-214.

BEHAN, A., **On the Matching Accuracy of Rastering Scanning Laser Altimeter Data**. ISPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, Part B3, Amesterdam, 2000.

BEHAN, A., **Quality Improviment of Scanning Laser Altimeter Data**. Disponível em:< [www.geo.tudelft.nl/frs/staff/avril/index.html](http://www.geo.tudelft.nl/frs/staff/avril/index.html)>. Acessado em janeiro de 2003

BOEHLER, W.; HEINZG, G.; MARBS, A., **The Potential of Non-Contact Close Range Laser Scanner for Cutral Heritage Recording**. CIPA Working Group VI, 2002.

BRANDALISE A. A., **Perfilamento a Laser: Comparação com Métodos Fotogramétricos**. Anais do I Simpósio Brasileiro de Geomática, presidente Prudente, 2002.

BRASIL. Decreto Lei 89.817 de 20 de junho de 1984.

BURROUGH, P.A. **Principies of Geográfical Information Sustems for Land Resources Assessment**. Clarendon: Press-Oxford. 1989.

CENTENO J. S., **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Curitiba 2001. Editora do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R., **Sistema Laserscanning: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. Curitiba, 2003. Editora do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR.

DAL POZ, A P., **Monorestituição: Uma nova Solução**. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA (1991: São Paulo). Anais... São Paulo: S.B.C., 1991, Vol 2 pp. 269-274.

DAL POZ, A P. **Monorestituição Aplicada à Atualização Cartográfica**. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA (1993: Rio de Janeiro). Anais... Rio de Janeiro: S.B.C., 1993., Vol. 2, pp. 410-417.

FELGUEIRAS, C. A., **Modelagem Numérica de Terreno**. <http://www.dpi.inpe/gilberto/livro>. Acesso em 04 de Março de 2003.

FERNANDES, J. C., **Criação de Modelos Digitais de Terreno**. Revista do Instituto Geográfico e Cadastral, 1998, pp 49-54.

GEMAEL, Camil. **Introdução ao Ajustamento de Observações**. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 1984.

GEOLAS CONSULTING., **Application Examples**. ([www.geolas.com](http://www.geolas.com)), Acessado em Dezembro de 2002.

HAALA, N. & BRENNER, C., **Interpretation of urban surfacemodels using 2D building information**. Computer Vision and Image Understanting. Vol 72, nº 2 November, pp 204-214, 1999.

LACTEC. **Materias e consultas feitas ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR)**, 2003.

LUGNANI, J. B., **Introdução à fototriangulação**. Curitiba, Editora UFPR, 1987.

MARACOVIC, B., **Digital mono-ploter**. ITC Journal, 1973-4, pp. 583-600.

MAAS, H., **Methods for Meassuring Height and Planimetry Discrepancies in Airbone Lasescanner Data**. Phtogrammetric Engeneering & Remote Sensing, vol. 68, pp 933-940, September, 2002.

MASAHARU H.& OHTSUBO, K. A., **Filtering Meted of Airbone Laser Scanner Data for Complex Terrain**. Cmission III, Working Group III/3, 2002.

MERCHANT, D. M., **Analytical photogrammetry. Theory and practice**, part I. Ohio State University, 1979.

MICROSTATION. **User's Guide – Academic Suite**. Bentley System, Inc. 1995.

MITISHITA, E. A., **Monorrestituição digital de fotos associada com sistema de computação gráfica CAD, para fins de mapeamento na área florestal**. Curitiba, 1997. Tese de doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFPR.

MITISHITA, E. A , **Manual de utilização do software “Sistema Monorestituidor Digital”, versão 2.0**. Curitiba, 1997b, 31p.

MORIN K.; EL-SHELMY N., **Post-Mission Adjustment Methods of Airbone Laser Scanning Data**. FIG XXII International Congress, Washington D.C., USA, April 19-26, 2002.

PETTINATI, F., **Modelagem Digital e Representação Gráfica de superfícies**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo - SP, 1983.

RIBEIRO, S. R. A.; SANTOS, D. R.; CENTENO, J. S., **Aplicação da metodologia de dados orientado a objeto na classificação de uma área urbanizada, utilizando uma imagem digital obtida por meio da tecnologia do laser scanner**. Anais do I Simpósio Brasileiro de Geomática, presidente Prudente, pp 144-149, 2002.

SANTOS, D. R., **Extração semi automática de edificações com análise no modelo numérico de elevações**. Presidente Prudente –SP 2002. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, UNESP.

STEINLE, E.; BAHR, H., **Laser Scanning for Change Detection in Urban Enviroment**. Istanbul, 1999.

OLIVAS, M. A de A. **Fundamentos de fotogrametria**. Setor de Ciências da Terra – UFPR. Curitiba, 1999.

OPTECH ABOUT ALTM SYSTEM. <http://www.optech.on.ca/> . Acesso em 16/10/2003.

SOUZA, S. R. N., **Uso da monorrestituição digital, aerofotos de pequena escala e modelamento matemático de superfície (DTM) para realização de mapeamento planimétrico**. Curitiba - PR, 2001. Dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

SURFER. **User's guide**. Golden Software Ins. 1999.

TOHT, C.; CSANYI N., DOROTA A., **Automating the Calibration of Airbone Multisensor Imaging Systems**. FIG XXII International Congress, Washington D.C., USA, April 19-26, 2002.

WEHR, A. ; LOHR U., **Airbone Laser Scanning – An Introduction and Overview**. ISPRS Journal of Photogrammetry & remote Sensing, pp. 68-82, 1999.

WOLF, P. R., **Elements of photogrammetry**. 2ª ed. McGraw-Hill Kogakusha, ldt., 1983